DEFINICION DE PLANETA • BIOLOGIA EVOLUTIVA DEL CANCER





Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA ERA DE LOS ROBOTS

EL PEZ CEBRA

LOS SONIDOS DEL ESPACIOTIEMPO

MEJORA DE LOS ANALGESICOS

LA FORMACION DEL MISSISSIPPI

RIBOINTERRUPTORES



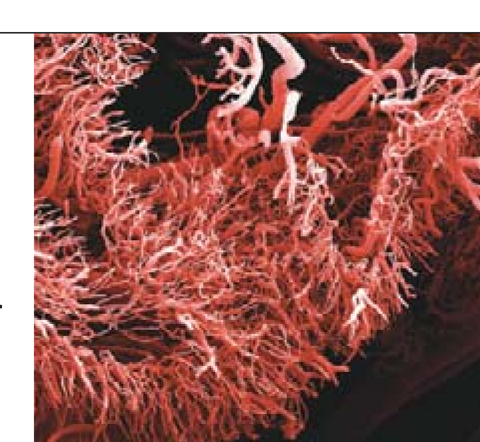
MARZO 2007
6,00 EUROS



Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Marzo de 2007

Número 366







DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Graham P. Collins, Steve Mirsky,
George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL
Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER
Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Brian Napack

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
Julia Domínguez
VdS Comunicación
Dr. Fleming, 56 - 3.º dcha.
28036 Madrid
Tel. y fax 913 591 965
Móvil 649 879 433

Cataluña:
Julián Queraltó
Queraltó Comunicación
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Definición de planeta*; Juan Manuel González Mañas: *Ribointerruptores*; Luis Bou: *Un robot en cada casa*, *Biología evolutiva del cáncer*; Sònia Ambrós: *La formación del Mississippi*; Ramón Pascual: *Los sonidos del espaciotiempo*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*



Portada: Louis Lemaire (*fotógrafo*); Mark Ho (*escultura*)

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



...cincuenta años

LOS NIÑOS Y LA FÍSICA. «La primera idea de un niño acerca de la velocidad, ¿la abarca como función de la distancia y del tiempo, o es algo más intuitivo y primitivo? Fue el mismo Albert Einstein quien me planteó la pregunta en 1928, un día en que le estuve mostrando algunos experimentos sobre causalidad. He puesto en práctica a partir de entonces un experimento muy sencillo que muestra que los niños no piensan en la velocidad en términos de la relación distancia-tiempo. Ante el niño situamos dos túneles, uno de ellos manifiestamente más largo que el otro; luego, por el interior de cada uno, empujamos sendos muñecos mediante una varilla metálica, de tal modo que los muñecos lleguen a la vez al otro extremo del túnel respectivo. Preguntamos al niño:

—¿Es alguno de los túneles más largo que el otro?
—Sí, ése.
—¿Iban los dos muñecos a la misma velocidad por los túneles, o iba uno más deprisa que el otro?
—A la misma velocidad.
—¿Por qué?
—Porque llegaron a la vez.

—Jean Piaget»

...cien años

ANTIGUA BABILONIA. «Antes de que la mano del destino la relegara a la decadencia, Nippur debió de ser un lugar de residencia muy deseado. La "biblioteca" allí descubierta consta de unos veinticinco mil libros y documentos en la forma, propia de la época, de tablillas de arcilla. El profesor Albert T. Clay, de la Universidad de Pennsylvania, ha traducido un buen número de ellas. Se diría que los primeros dichos quejumbrosos acerca de la futilidad de la huida de la muerte y de los cobradores de impuestos fueron emitidos por el espíritu agobiado de un residente en Nippur, 1400 a.C., pues muchos de los documentos hallados corresponden a anotaciones de recibos de alquiler o impuestos. Los impuestos se pagaban, no con monedas, sino con productos naturales, tales como maíz, sésamo, aceite, dátiles, harina y ganado.»

MÚSICA POR TELÉFONO. «El maravilloso invento del doctor Cahill, el "tele-armonio", se basa en la generación de oscilaciones eléctricas en correspondencia con las vibraciones acústicas de los distintos tonos elementales deseados, la síntesis de las diferentes notas y cuerdas requeridas, y la transmisión de esas oscilaciones mediante hilos conductores hasta el punto que se desee; se convierten entonces en audibles las vibraciones eléctricas sintetizadas mediante un dispositivo convertidor, tal como un receptor telefónico ordinario o un arco parlante (que en nuestra ilustración aparece disfrazado de planta colgante).»

PANSPERMIA. «Se ha demostrado que el frío intenso no resulta perjudicial para todos los gérmenes. El frío rebajaría de modo similar la rapidez de los cambios químicos inducidos por la luz y la velocidad de desecación. De ello podría quizá concluirse que el efecto preservador de las bajas temperaturas del espacio interestelar asegura la posibilidad del paso de gérmenes vivos de un sistema solar a otro. Por tanto, la generación espontánea resulta innecesaria, pues la vida se transmite desde un cuerpo celestial a otro mediante gérmenes minúsculos impulsados por la presión lumínica. Esta idea implica otra, que me atrae fuertemente, a saber, que todos los organismos del universo están relacionados y que el proceso de la evolución es el mismo en todas partes.

—Profesor Svante Arrhenius»

...ciento cincuenta años

FUEGO Y ALGODÓN. «El reciente incendio en Mobile, que destruyó varios miles de balas de algodón, ha provocado una amplia polémica en la prensa del sur acerca de la conveniencia de empacar con alambre el algodón. La principal ventaja del alambre es que no arde como la cuerda, que, al soltarse, dispersa el algodón exponiéndolo a las llamas y al viento, lo que causa la destrucción de otras balas que estén a su alcance. El algodón atado con alambre difícilmente arde, y si con todo se propaga una combustión en su seno, será una combustión sin llama.»

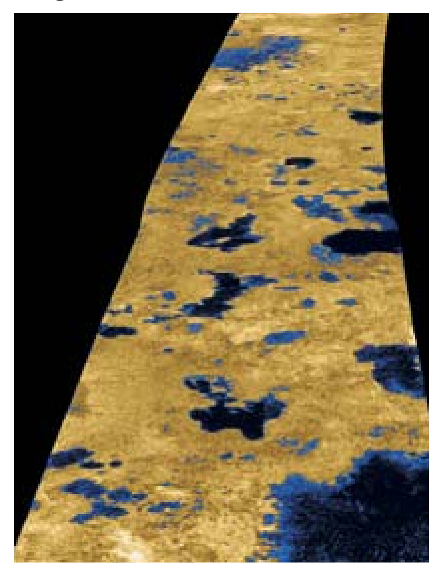
TENDIDO DE CABLES. «El Secretario de Marina ha ordenado a los vapores *Niagara* y *Mississippi* trasladarse a Inglaterra este verano, para colaborar en el tendido del cable telegráfico submarino entre Terranova e Irlanda. El *Niagara* es el vapor de guerra mayor del mundo y el *Mississippi* el vapor de paletas más potente de nuestra Armada.»



Una orquesta virtual: música sintetizada eléctricamente se transmite mediante altavoces disimulados en plantas colgantes, un invento de 1907

TITAN

Lagos de metano



Una densa niebla de metano envuelve Titán, la misteriosa luna de Saturno. En ello se basaba la hipótesis de que en la superficie existiera metano líquido, aunque las sondas no habían logrado hallarlo. Hasta que imágenes recientes tomadas con radar por la sonda espacial Cassini acaban de ofrecernos cerca del polo norte 75 zonas de aspecto lacustre. Algunas se extienden a lo largo de 70 kilómetros. Creen los científicos que se trata de depresiones llenas de líquido, pues en ellas la temperatura (–179 grados Celsius) y la presión (vez y media la que hay en la superficie terrestre) propician la persistencia del metano y del etano, producto de la descomposición de aquel. Los lagos podrían llenarse con líquido acumulado en el subsuelo, o bien merced a la evaporación y consiguiente lluvia de hidrocarburos. Futuros acercamientos revelarán eventuales variaciones estacionales de los lagos y su posible existencia en otros lugares de la superficie de Titán.

—David Biello

Lagos de metano salpican la superficie de Titán en esta fotografía en falso color tomada por la sonda Cassini

ZOOLOGIA

El párpado interno de los gatos

El párpado interno de los gatos desempeña un papel crucial para la conservación de la higiene en la superficie ocular. Ese tercer párpado es tan importante, que entre los mamíferos y las aves es la regla. Las especies que carecen de ella, como los humanos y la mayoría de los primates, son excepciones. El tercer párpado —denominado con mayor formalidad *palpebra tertia*— es anatómicamente complejo. Consiste en un pliegue de tejido revestido de una membrana mucosa especializada (la conjuntiva). Una densa población de folículos linfoides llena la cara en contacto con la superficie del ojo y la película lacrimal. Esos folículos actúan como nudos linfáticos del ojo, protegiendo la superficie de éste frente a invasiones de microorganismos. Entre las dos capas de la conjuntiva se encuentra una densa placa de cartílago en forma de T, cuyo travesaño confiere rigidez al borde libre del tercer párpado, que es curvo para adaptarse a la superficie de la córnea (la cubierta traslúcida del frente del ojo). Una glándula lacrimal accesoria, que produce una fracción grande de la capa lacrimal, rodea el tronco de la T.



Cuando el gato está alerta, la casi totalidad del tercer párpado queda oculta dentro de la cuenca del ojo; sólo se ve una pequeña parte, en la esquina interna del ojo. Cuando el felino está relajado, dormido o parpadeando, un conjunto de músculos óseos contrae el globo ocular, haciendo que el tercer párpado se mueva de un lado a otro de la superficie ocular y cubra por completo la córnea. Al hacer eso, el tercer párpado actúa a modo de escobilla limpiaparabrisas, que elimina los detritus de la superficie y redistribuye las lágrimas sobre la córnea. Se cree, además, que protege la córnea de lesiones cuando el animal se mueve por hierbas altas o captura una presa.

La presencia de una glándula lacrimal accesoria facilita una limpieza de la superficie ocular más regular que en los primates, y el tercer párpado parece asimismo mantener la película lacrimal contra la córnea con más efectividad que los párpados externos. Aunque no se sabe por qué carecemos de tercer párpado; posiblemente se deba a que no capturemos presas mordiendo (como los gatos) ni nos alimentemos hozando en la vegetación (como los caballos). Por tanto, la presencia de esa medida protectora adicional puede que no suponga una ventaja para nuestra supervivencia.

—Paul Miller,
veterinario oftalmólogo de la Universidad de Wisconsin-Madison

NASA/JPL/USGS (*arriba*); MATT COLLINS (*abajo*)

ASTRONAUTICA

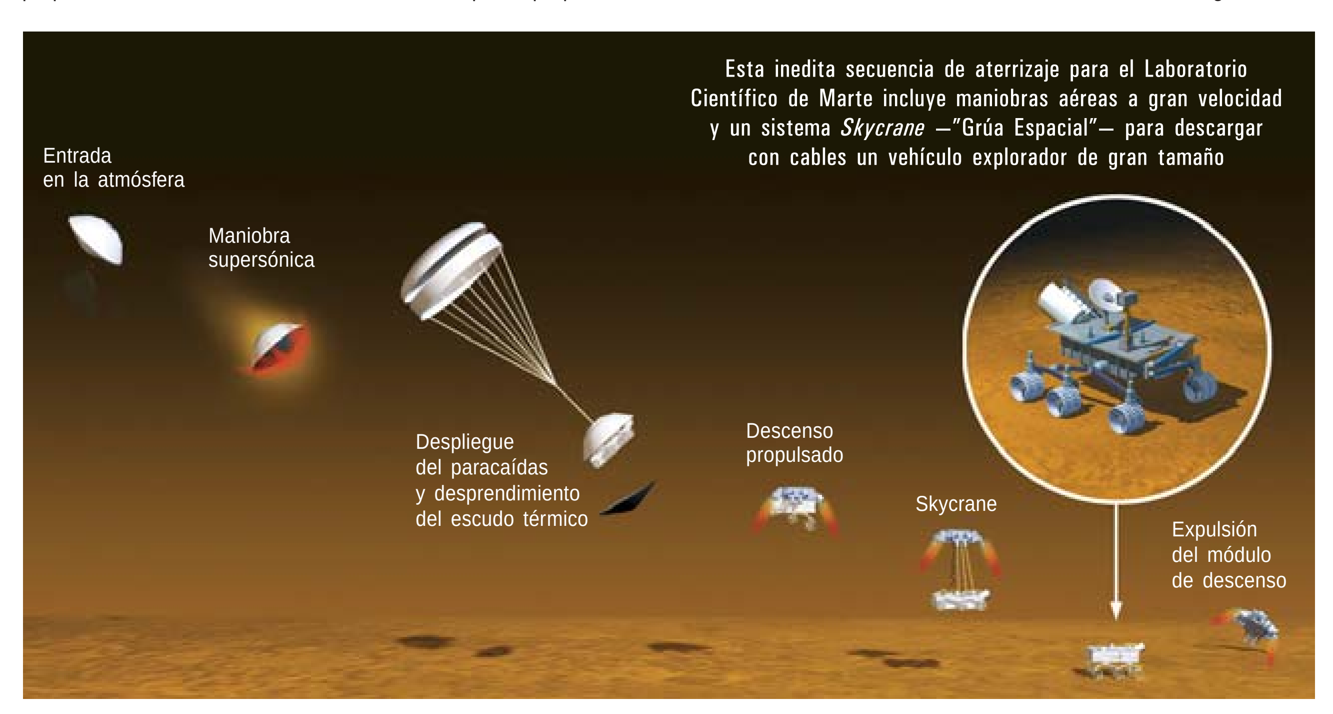
La grúa marciana

La NASA tiene la intención de llevar a la superficie de Marte, en 2010, un vehículo explorador del tamaño y peso de un viejo Mini. Y proyecta hacerlo de una manera hasta ahora inédita: se pilotaría la cápsula de entrada a modo de ala volante supersónica hasta el lugar de aterrizaje, donde se cerniría a 20 metros del suelo mientras descarga en éste el vehículo por medio de cables de kevlar. Si la carga se balancease, la nave se movería de lado para estabilizarla.

Los ingenieros pensaron en tan audaz —y controvertido— procedimiento ante el insólito tamaño del Laboratorio Científico de Marte (LCM). Su masa cuadruplica con creces las de Spirit y Opportunity, hoy en el planeta rojo. La cápsula que lo encierre, de 4,5 metros de ancho, será mayor incluso que el módulo de mando Apolo; el escudo térmico será el mayor que hasta ahora haya penetrado en una atmósfera. Spirit y Opportunity rebotaron en la superficie amortiguados por unos enormes petos de aire; los del LCM pesarían tanto, que no permitirían más carga útil. La toma de tierra sobre patines tendría sus propios inconvenientes. Los aterrizadores con patas propenden a volcarse. Y los retrocohetes tendrían que actuar tanto tiempo, que excavarían un cráter grande y levantarían nubes de polvo perjudiciales para los equipos de a bordo. El motor debería apagarse exactamente en el momento preciso, pero se sospecha que el Mars Polar Lander, que aterrizaba sobre patas, se estrelló en 1999 por culpa de un sensor hipersensible que cortó el motor demasiado pronto. El LCM no requiere sensores de aterrizaje. La nave nodriza sabe que ha descargado el vehículo cuando percibe que necesita menos empuje de los cohetes para mantenerse en posición; en ese momento, unas cargas explosivas cortan los cables y la nave nodriza es proyectada a varios centenares de metros, donde se estrella.

El nombre del sistema, *Skycrane*, rinde homenaje a los helicópteros grúa Sikorsky, en los que se inspira. No se pueden llevar a cabo ensayos completos de este método de aterrizaje en la Tierra porque aquí la gravedad y la presión atmosférica son muy diferentes. Pero lo mismo ocurrió con Spirit y Oportunity, o los Viking.

—George Musser



Esta inedita secuencia de aterrizaje para el Laboratorio Científico de Marte incluye maniobras aéreas a gran velocidad y un sistema *Skycrane* —"Grúa Espacial"— para descargar con cables un vehículo explorador de gran tamaño

LONGEVIDAD

El gen CETP

Si llega el lector a los cien años, como es el caso de uno de cada 10.000 humanos, deseará que la mente y el cuerpo se encuentren lo más intactos que sea posible. Hay un gen que parece facilitarlo. Nir Barzilai, de la Escuela de Medicina Albert Einstein de Nueva York, y sus colaboradores examinaron a 158 ancianos de ascendencia judía askenazi. Los centenarios que aprobaron un test de 30 preguntas tenían una probabilidad de dos a tres veces mayor de poseer una variante común del llamado gen CETP que los que no lo aprobaron. Los de 75 a 85 años que aprobaron el test tenían una probabilidad cinco veces mayor. La variante del gen CETP ocasiona que las partículas de colesterol en la sangre presenten un tamaño superior al normal, lo que quizás impida su alojamiento en el revestimiento de los vasos sanguíneos, un proceso que multiplica el riesgo de ataques cardíacos y accidentes cerebrovasculares.

—Charles Q. Choi



La longevidad y la conservación de la agudeza mental podrían compartir un vínculo genético

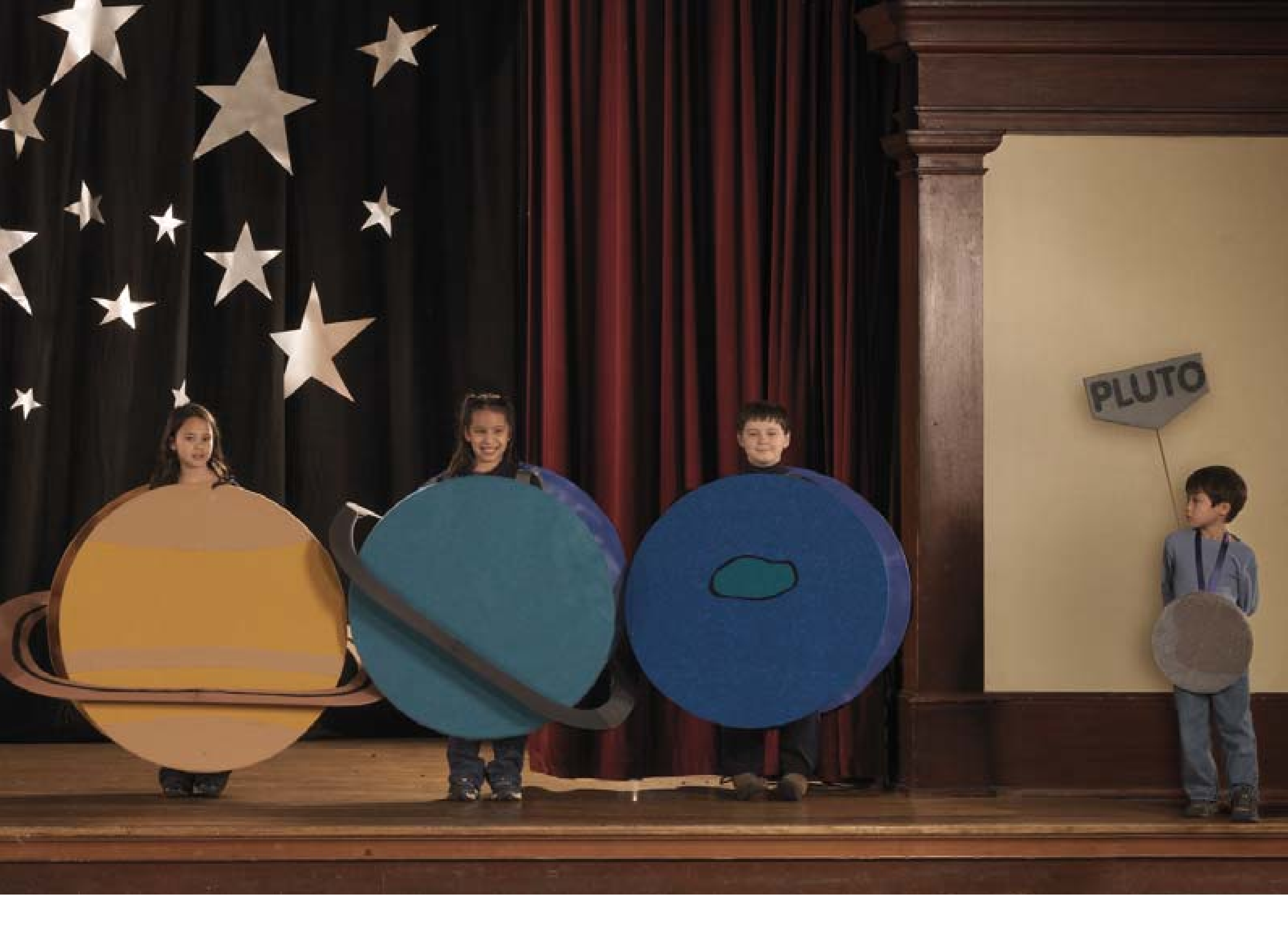
DON FOLEY (*arriba*); PHOTONICA/GETTI IMAGES (*abajo*)



Definición de planeta

Steven Soter

La nueva definición oficial de “planeta”, que descarta como tal a Plutón, aunque deja cabos sueltos recoge los principios científicos esenciales



DAVID EMMITE PHOTOGRAPHY

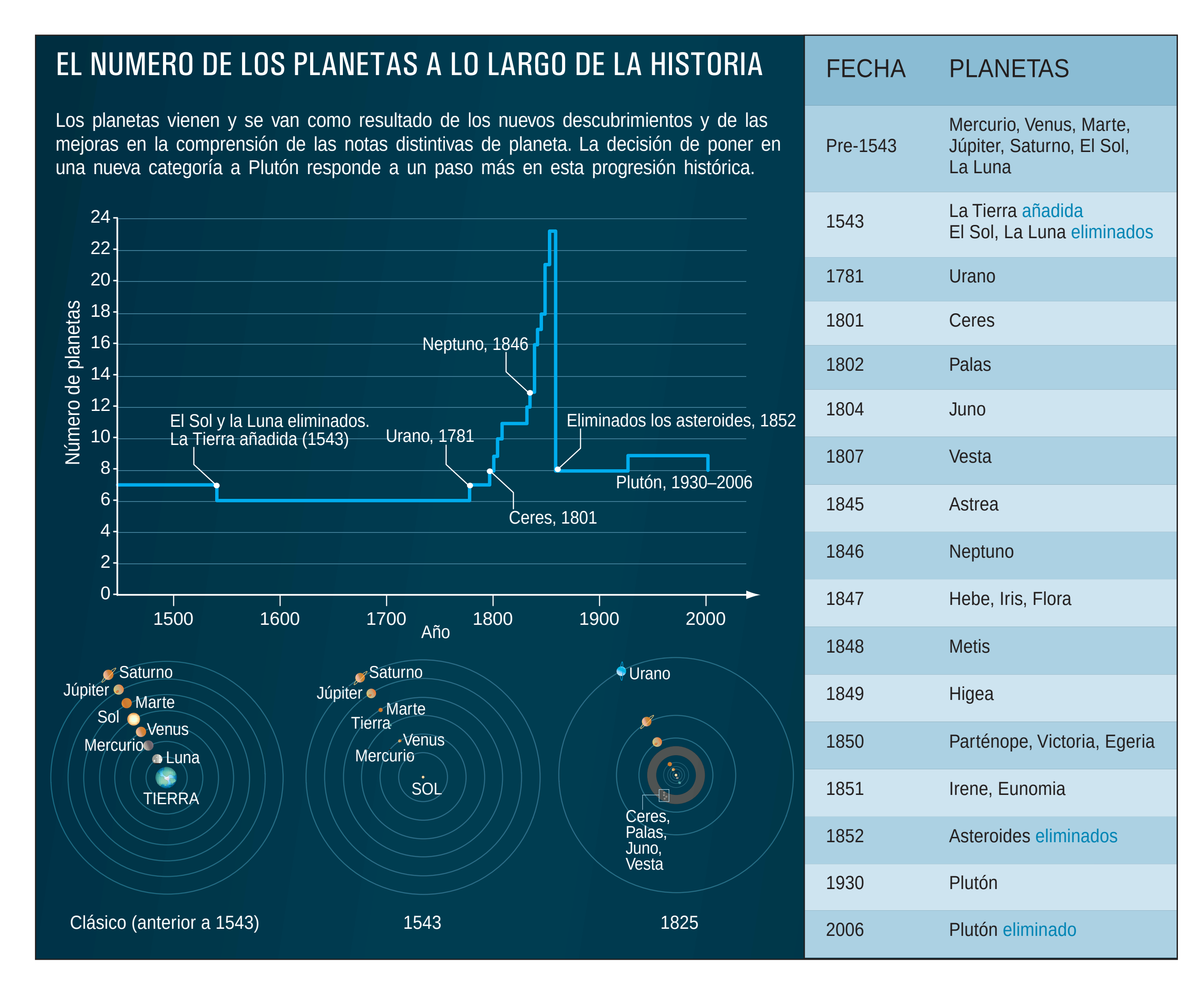
Hemos crecido con una definición de planeta que aplicaba el término a los cuerpos que giran alrededor de una estrella, brillan al reflejar la luz estelar y son mayores que un asteroide. Aunque imprecisa, repartía en categorías claras a los cuerpos celestes que se conocían. En los años noventa, sin embargo, una serie de descubrimientos importantes socavaron la definición. Más allá de la órbita de Neptuno, en una región de forma de rosquilla, el cinturón de Kuiper, se encontraron cientos de mundos helados, algunos de gran tamaño. Alrededor de otras estrellas se descubrieron planetas, muchos de los cuales presentan órbitas muy diferentes de las descritas por los planetas de nuestro sistema solar. Se descubrieron, además, las enanas marrones, cuerpos en los que se difumina la distinción entre planetas y estrellas. Y se hallaron cuerpos similares a los planetas que se mueven sin compañía en la oscuridad del espacio interestelar.

Semejante gavilla de hallazgos desencadenó el debate sobre las notas distintivas de un planeta. En agosto de 2006, la Unión Astronómica Internacional (UAI), la principal agrupación profesional del ramo, se congregó para definir un planeta: un objeto que orbita alrededor de una estrella, presenta tamaño suficiente para adoptar forma esférica y —cláusula clave— "ha despejado los alrededores de su órbita". La nueva definición dejaba a Plutón fuera de la lista de planetas, con la oposición de varios participantes, que organizaron una petición de protesta.

No se trata de un debate terminológico. La cuestión reviste interés científico. La nueva definición de planeta refleja los avances en el conocimiento de la arquitectura de nuestro sistema solar y de otros sistemas planetarios. Tales sistemas se formaron por acrecimiento dentro de discos en rotación: granos pequeños se agruparon para formar granos más voluminosos, que a su vez se aglomeraron hasta crear otros mayores, y así sucesivamente. Con el tiempo, este proceso fabrica cierto número de cuerpos grandes, los planetas, y un elevado número de cuerpos más pequeños, los asteroides y cometas, residuos de la formación planetaria. En resumen, "planeta" no corresponde a una categoría arbitraria, sino a una clase objetiva de cuerpos celestes.

Cuando la Tierra se convirtió en planeta

La reevaluación de la naturaleza de los planetas cuenta con profundas raíces históricas. Los griegos de la antigüedad clásica reconocieron siete fuentes de luz en el cielo que no seguían el patrón de movimiento del resto de las estrellas: el Sol, la Luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Las llamaron *planetes*, o errantes. La Tierra no aparecía en esa lista. Durante la mayor parte de la historia de la Humanidad, se consideró a la



FECHA	PLANETAS
Pre-1543	Mercurio, Venus, Marte, Júpiter, Saturno, El Sol, La Luna
1543	La Tierra añadida El Sol, La Luna eliminados
1781	Urano
1801	Ceres
1802	Palas
1804	Juno
1807	Vesta
1845	Astrea
1846	Neptuno
1847	Hebe, Iris, Flora
1848	Metis
1849	Higea
1850	Parténope, Victoria, Egeria
1851	Irene, Eunomia
1852	Asteroides eliminados
1930	Plutón
2006	Plutón eliminado

LUCY READING-IKKANDA

Tierra centro —o fundamento— del universo, no planeta. Copérnico persuadió a los astrónomos de que era el Sol, no la Tierra, el cuerpo que permanecía en el centro. Entonces se añadió nuestro planeta al elenco, del que se borró al Sol y la Luna. Los telescopios aumentaron la lista con Urano en 1781 y Neptuno en 1846.

De Ceres, hallado en 1801, se pensó, en un comienzo, que constituía el planeta perdido que rellenaba el hueco entre Marte y Júpiter. Pero los astrónomos empezaron a abrigar dudas al descubrirse al año siguiente Palas en una órbita parecida. A diferencia de los planetas clásicos, que los telescopios ven como pequeños discos, lo mismo Ceres que Palas irrumpían como simple motas de luz. William Herschel propuso llamarlos "asteroides". Para 1851 el número de asteroides había aumentado a 15; no cabía ya considerarlos planetas. Los astrónomos decidieron entonces nombrar a los asteroides por el orden de descubrimiento, no por su distancia al Sol —como es el caso de los planetas—, reconociendo con ello que los asteroides debían numerarse entre los miembros de una familia genuina. Si hoy día clasificáramos a los asteroides como planetas, los niños estudiarían en la escuela que el sistema solar posee más de 135.000 planetas.

Plutón tiene una historia parecida. Cuando Clyde Tombaugh lo descubrió en 1930, se le dio la bienvenida como si fuera el "planeta X", largo tiempo buscado y cuyo campo de gravedad vendría a explicar las peculiaridades de la órbita de Neptuno. Plutón resultó ser menor que los

Resumen/*Definición de planeta*

- El pasado agosto, los miembros de la Unión Astronómica Internacional (UAI) aprobaron la nueva definición de planeta: cuerpo que orbita en torno a una estrella, alcanza tamaño suficiente para tener forma esférica y ha despejado de otros objetos su entorno. Aunque se proponía cerrar un largo debate, parece haber arrojado combustible al fuego.
- Los críticos opinan que la definición es arbitraria e imprecisa, pero se trata de una acusación infundada. El sistema solar se divide en ocho cuerpos de gran masa que dominan sus zonas orbitales y enjambres de cuerpos menores con órbitas que se cortan entre sí. Este modelo parece reflejar la manera en que se formó y evolucionó el sistema solar.

demás planetas y que siete satélites de otros planetas, Luna incluida. Los análisis posteriores de la órbita de Neptuno revelaron que no presentaba las peculiaridades alegadas. Durante sesenta años, Plutón constituyó una anomalía singular en los confines de nuestro sistema planetario.

Del mismo modo que Ceres comenzó a adquirir sentido cuando se le reconoció un lugar en la extensa población de asteroides, Plutón encontró su sitio al descubrirse que formaba parte de la inmensa población de objetos del cinturón de Kuiper [*véase* "El cinturón de Kuiper", por Jane X. Luu y David C. Jewitt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1996, y "Migración planetaria", por Renu Malhotra; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1999]. Los astrónomos empezaron a preguntarse si Plutón debía ser llamado planeta. Desde el punto de vista histórico, que un cuerpo pierda la categoría de planeta tiene precedentes. Sucedió con el Sol, la Luna y los asteroides. No obstante, muchos se mostraron a favor de mantenerle a Plutón la categoría de planeta, puesto que nos habíamos acostumbrado a considerarlo como tal.

El descubrimiento en 2003 de Eris (antes llamado 2003 UB313 o Xena), un objeto del cinturón de Kuiper mayor que Plutón, reavivó el debate. Si Plutón es un planeta, entonces Eris debería también serlo, así como los demás objetos grandes del cinturón; pero si se le negaba esa consideración a Plutón, tampoco debería aceptarse para los demás cuerpos del cinturón de Kuiper. ¿En qué argumentos objetivos habría que fundamentar la decisión?

Despejando el camino

Para evitar que la lista de planetas se dilatase sin fin, Alan Stern y Harold Levison, del Instituto de Investigación del Suroeste, propusieron en el año 2000 que se definiera planeta como "cuerpo de menor masa que una estrella y tamaño suficiente para que su campo de gravedad venza su rigidez estructural y le dé una forma redonda". La mayoría de los objetos con radio superior a varios cientos de kilómetros satisfacen el último criterio. Los cuerpos de menor tamaño suelen presentar formas más escarpadas; muchos no son más que peñones gigantescos.

La "Comisión para la definición de planeta" de la UAI, encabezada por Owen Gingerich, de la Universidad de Harvard, abogó por esa definición a primeros de agosto de 2006. Hubiera mantenido a Plutón como planeta, pero a expensas de admitir a docenas de objetos del cinturón de Kuiper y de restablecerle la condición planetaria a Ceres, el mayor asteroide y único esférico.

Muchos astrónomos argumentaron contra el criterio de esfericidad. En términos prácticos, resulta muy difícil observar la forma de los objetos del cinturón de Kuiper, remotos, por lo que su naturaleza permanecería incierta. Es más, asteroides y objetos del cinturón cubren un espectro casi continuo de tamaños y formas. ¿Cómo cuantificar el grado de esfericidad para distinguir a los planetas? ¿Diremos que la gravedad domina la forma del cuerpo, si su apariencia se desvía de una esfera por un 10 % o por un 1 %? El cosmos no proporciona una separación clara entre las formas esféricas y las no esféricas, por lo que cualquier frontera se fijaría arbitrariamente.

Stern y Levison propusieron un criterio diferente que conduce a un método de clasificación no arbitrario. Señalaron que algunos cuerpos del sistema solar tienen tanta masa, que han barrido o dispersado a sus vecinos inmediatos. Los cuerpos más ligeros, incapaces de tanto, ocupan órbitas inestables y transitorias, o tienen a un guardián más pesado que estabiliza sus trayectorias. Así, la Tierra es lo suficientemente grande para barrer o alejar de sí cualquier cuerpo que se aproxime demasiado, un asteroide por ejemplo. Al mismo tiempo, la Tierra protege a la Luna de ser barrida o dispersada. Cada uno de los cuatro planetas gigantes gobierna sobre una nutrida camada de satélites. Júpiter y Neptuno mantienen su propia familia de asteroides y objetos del cinturón de Kuiper (troyanos y plutinos, respectivamente) en órbitas particulares con resonancias estables, en las que una sincronización orbital impide la colisión con los planetas.

Estos efectos dinámicos sugieren una definición práctica de planeta. Desde esa óptica, llamaríamos planeta a un cuerpo grande y capaz de gobernar su zona orbital mediante la expulsión de los objetos menores, su

RESPUESTA A LAS PREGUNTAS MAS FRECUENTES

P ¿No es arbitraria la definición de planeta?

R La ciencia necesita definiciones precisas para avanzar. Las definiciones reflejan nuestro conocimiento de las relaciones básicas de la naturaleza. Si los nuevos descubrimientos prueban que una definición recibida cae en la confusión o la ambigüedad, hemos de revisarla.

P ¿En qué erraba la anterior definición que establecía que un planeta es un cuerpo no luminoso, mayor que un asteroide, que gira alrededor de una estrella?

R No distingue entre los planetas y los objetos del cinturón de Kuiper, pese a sus claras diferencias.

P La definición aprobada por la Unión Astronómica Internacional establece que un planeta "ha despejado los alrededores de su órbita". Pero muchos asteroides y cometas cruzan la órbita de la Tierra; entonces, ¿por qué seguimos llamándola planeta? ¿Por qué es Júpiter un planeta? Los asteroides troyanos comparten la órbita de Júpiter, por lo que Júpiter no ha "despejado" su vecindad.

R El barrido nunca es perfecto. Asteroides, cometas y meteoritos siguen perdiéndose por las inmediaciones de los planetas. Aun así, la cantidad de estos escombros es despreciable, en comparación con la masa de cada planeta. Una definición más precisa establecería que los planetas "dominan" su zona orbital. La gravedad de Júpiter controla las órbitas de los asteroides troyanos. La definición de la UAI se basa en la idea correcta, pero el uso no matizado de la palabra "despejado" ha creado alguna confusión.

Las preguntas continúan en la página 12.

eliminación en colisiones directas o su apresamiento en órbitas estables. De acuerdo con la física básica de la dinámica orbital, la probabilidad de que un cuerpo pueda apartar de sus proximidades a un objeto menor durante la vida del sistema solar es proporcional al cuadrado de su masa (lo que determina el alcance gravitatorio del cuerpo mayor para un cierto grado de desviación) e inversamente proporcional al período orbital (que indica la frecuencia de los encuentros).

Los ocho planetas, de Mercurio a Neptuno, tienen una probabilidad de barrer o desviar cuerpos pequeños que multiplica miles de veces la de los mayores asteroides y objetos del cinturón de Kuiper, incluidos Ceres, Plutón y Eris. Mercurio y Marte carecen de masa suficiente para dispersar todos los cuerpos de su vecindad. Pero Mercurio puede absorber la mayoría de los objetos pequeños que cruzan su órbita y Marte cuenta con la suficiente capacidad gravitatoria para desviar hacia órbitas inestables los objetos que se le aproximan, incluidas algunas con períodos exactamente iguales a una tercera o una cuarta parte de la de Júpiter. La gravedad de los planetas gigantes completa la tarea de expulsar de los alrededores de Marte tales objetos.

La aptitud de los astros para despejar de objetos su vecindad depende del contexto dinámico; no es una propiedad intrínseca de los astros. Con todo, la enorme distancia entre el poder dinámico de los planetas y el de los otros cuerpos es el fundamento para distinguir entre aquéllos y éstos. No necesitamos establecer una distinción arbitraria porque, al menos en nuestro sistema solar, la naturaleza lo hace por nosotros.

Reyes de sus reinos

Otro criterio semejante fue propuesto por Michael Brown, del Instituto de Tecnología de California, en 2004. Definió así el planeta: "cuerpo del sistema solar cuya masa supera la suma de las masas de los demás cuerpos con órbitas parecidas". Para ser más precisos, yo he sugerido sustituir "órbitas parecidas" por el concepto de "zona orbital". Dos cuerpos comparten la misma zona si sus órbitas se cruzan en algún momento, si sus períodos orbitales respectivos difieren

DON DIXON (*sistema solar*); LUCY READING-IKKANDA (*gráfica y órbitas*)

EL "NUEVO" SISTEMA SOLAR

La definición de planeta aprobada por la Unión Astronómica Internacional se basa en la arquitectura observada del sistema solar, donde un número pequeño de cuerpos dominantes, los ocho planetas, presentan órbitas bastante separadas; no así los enjambres de asteroides, cometas y objetos del cinturón de Kuiper. Ceres y Plutón, antaño considerados planetas, son (como Eris) moradores de esos enjambres. Los asteroides troyanos comparten la órbita con Júpiter y están controlados dinámicamente por el planeta. Los Centauros son cometas que se hallan entre Júpiter y Neptuno.

PLUTON
Disco disperso
Cinturón de Kuiper
NEPTUNO
ERIS

TAXONOMIA DE LOS CUERPOS CELESTES

OBJETOS PRIMARIOS: las estrellas, las enanas marrones y las subenanas marrones

Se forman por el colapso gravitatorio de una nube interestelar. Los objetos con al menos 80 veces la masa de Júpiter mantienen una fusión nuclear estable del hidrógeno; se llaman estrellas. Los que tienen masas comprendidas entre 13 y 80 jupíteres presentan reacciones nucleares del deuterio, un isótopo poco abundante del hidrógeno, durante un breve lapso de tiempo; se denominan enanas marrones. Los cuerpos de menor masa podrían denominarse subenanas marrones.

OBJETOS SECUNDARIOS: los planetas

Se forman cuando los granos de polvo se agrupan juntos en un disco que rota alrededor de un objeto primario. Pasan por un período de crecimiento galopante, en el cual los cuerpos de mayor masa despejan su zona de la mayor parte del material. Un planeta que alcance un tamaño crítico puede incluso atraerse una densa envoltura de gas.

OBJETOS TERCIARIOS: los satélites

Orbitan en torno a los objetos secundarios, bien porque se han formado ahí mismo, bien porque han sido capturados de órbitas independientes.

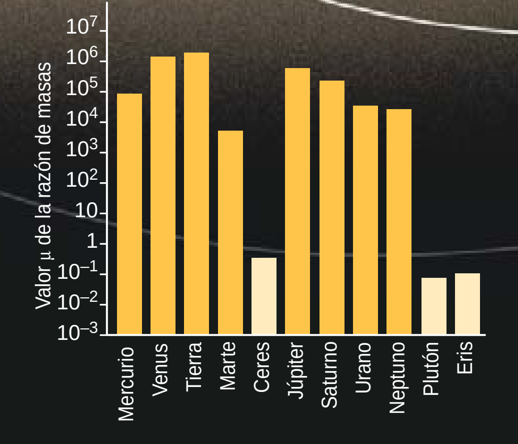
ESCOMBROS: los asteroides, cometas y objetos del cinturón de Kuiper

Se forman como los objetos secundarios, pero su crecimiento se detuvo. No controlan dinámicamente sus zonas orbitales. Los asteroides son pequeños mundos de roca; la mayoría residen en un cinturón entre las órbitas de Marte y Júpiter. Los objetos del cinturón de Kuiper son cuerpos pequeños, de hielo, que orbitan más allá de Neptuno; este cinturón parece ser la fuente de la mayoría de los cometas periódicos. La distinción entre cometas y asteroides resulta ambigua en ocasiones: los cometas contienen más sustancias volátiles y se forman más lejos del Sol.

PLANETAS ERRANTES

Se formaron como los objetos secundarios, pero han sido expulsados al espacio interestelar. Las simulaciones sugieren que estos objetos podrían sobrepasar en número a las estrellas de nuestra galaxia. Observacionalmente, sin embargo, resultará muy difícil detectarlos y distinguirlos de las subenanas marrones aisladas que nacieron como objetos primarios.

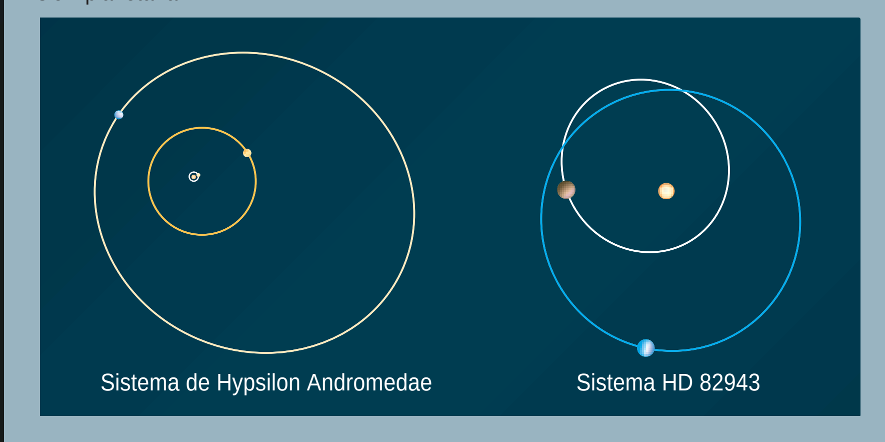
MERCURIO
Cinturón principal de asteroides
TIERRA
MARTE
VENUS
SOL
JUPITER
CERES
URANO
SATURNO
Asteroides troyanos
Centauros



LA DIVISION nítida entre los planetas (*color dorado*) y los objetos más pequeños (*color crema*) queda de manifiesto en el parámetro μ: la masa de un cuerpo dividida por la masa total de los demás cuerpos que comparten su zona orbital. Los ocho planetas tienen un valor de μ superior a 5000, mientras que el valor μ de Plutón es inferior a 1. Una cantidad de μ igual a 100 podría valer como línea divisoria entre planetas y cuerpos no planetarios de nuestro sistema solar.

OTROS PLANETAS DE LA GALAXIA

El dominio orbital de unos pocos cuerpos parece también prevalecer en otros sistemas planetarios conocidos. En la mayoría, las órbitas de los planetas no convergen (*izquierda*); por esa razón no colisionan los planetas. En los contados casos en que se solapan las órbitas (*derecha*), existe una sincronización orbital que impide la colisión planetaria.



MAS PREGUNTAS

P La órbita de Plutón se cruza con la de Neptuno; ¿por qué Neptuno es un planeta y Plutón no?

R La masa de Neptuno es más de 8000 veces mayor que la de Plutón y domina gravitatoriamente sus alrededores. Hace mucho tiempo, Neptuno selló la órbita de Plutón en resonancia con la suya propia, lo que hace imposible una colisión entre los dos objetos. Plutón es demasiado pequeño para dominar más allá de sus propios satélites (uno de los cuales, Caronte, alcanza casi la mitad del tamaño de Plutón).

P Tener un satélite ¿no califica a un cuerpo celeste como planeta?

R No. Muchos asteroides y objetos del cinturón de Kuiper tienen satélites, pero Mercurio y Venus no, y nadie niega que sean planetas.

P Si se descubriera un objeto del tamaño de Marte en la parte exterior del cinturón de Kuiper, o un objeto como Neptuno en la lejana nube de Oort, ¿los llamaríamos planetas?

R No en función de la nueva definición, puesto que tales objetos no habrían dominado sus alrededores. Quizá tendríamos que acuñar un nuevo término para estos cuerpos.

P ¿No es mejor clasificar los cuerpos celestes en función de sus propiedades intrínsecas, en vez de basarse en su contexto orbital?

R No necesariamente. Clasificamos ya muchos objetos como satélites o lunas en función de su situación orbital. Algunos son del tamaño de los planetas; otros, simples capturas de asteroides o cometas. Pese a ello, los clasificamos en un mismo grupo por su característica dinámica de orbitar en torno a un planeta.

en menos de un factor 10 y si no se encuentran en resonancia estable. Para aplicar esta definición, he elaborado un censo de los cuerpos pequeños conocidos alrededor del Sol.

La Tierra, por ejemplo, comparte su zona orbital con unos 1000 asteroides de diámetro superior a un kilómetro, la mayoría de los cuales llegó a la zona no hace mucho desde el cinturón principal de asteroides, situado entre Marte y Júpiter. En total apenas suman un 0,0001 por ciento de la masa total de nuestro planeta. Designemos la razón entre la masa de un cuerpo y la masa total de los otros objetos en su zona orbital con la letra griega μ. En el caso de la Tierra, μ es igual a 1,7 millones. Parece que es el mayor valor de μ de todo el sistema solar. La masa de Júpiter, 318 veces mayor, comparte también su zona orbital con un mayor número de objetos. Marte tiene el menor valor de μ (5100) entre todos los planetas y, aun así, su parámetro μ es muchísimo mayor que el de Ceres (0,33) o el de Plutón (0,07). Un resultado llamativo: los planetas se encuentran en una categoría diferente de la de asteroides y objetos del cinturón de Kuiper, siendo Plutón claramente un miembro del cinturón.

Estos argumentos persuadieron a la UAI para definir el concepto de planeta basándose en la "limpieza" de las proximidades orbitales. La UAI ha de depurar la noción y especificar el grado de "limpieza" que calificaría a un planeta como tal. He sugerido establecer el corte en un valor de μ igual a 100. Es decir, un cuerpo del sistema solar es un planeta si contiene más del 99 % de la masa total de su zona orbital. Pero el valor exacto del corte no tiene mucha importancia. Cualquier valor entre 10 y 1000 sería igualmente válido.

Un planeta es, por tanto, un cuerpo que ha barrido o dispersado la mayor parte de la materia de su zona orbital. La clara separación entre planetas y otros objetos pone de manifiesto aspectos relevantes en la formación del sistema solar. Todos estos cuerpos nacieron de un disco plano de gas y polvo que giraba alrededor de un Sol joven. En la competencia por la limitada cantidad de materia original, algunos cuerpos ganaron la partida. Su crecimiento se retroalimentó y, en lugar de que se generara un espectro continuo de cuerpos de todos los tamaños, el resultado fue un cuerpo gigante que dominaba su zona orbital. Los cuerpos pequeños fueron barridos por los mayores, expulsados del sistema solar o engullidos por el Sol; los supervivientes se convirtieron en los planetas que observamos en la actualidad. Los asteroides y los cometas, incluidos los objetos del cinturón de Kuiper, constituyen los escombros residuales.

El proceso de acreción de nuestro sistema solar se encuentra ahora en su fase final de limpieza. Los asteroides dibujan órbitas que se cortan; pueden chocar entre sí o con los planetas. El cinturón de Kuiper es el remanente de las regiones más externas del disco original, donde la densidad de materia era demasiado baja para formar otro planeta. Los planetas del sistema solar describen órbitas que no se cruzan y, por tanto, no hay colisiones planetarias. Puesto que son los cuerpos que dominan dinámicamente, debe escasear su número. Si otro planeta tratara de penetrar entre los ya existentes, las perturbaciones gravitatorias desestabilizarían las órbitas.

Se observa una situación similar en otros sistemas planetarios. Conocemos 20 sistemas planetarios con más de un planeta. En su mayoría, los planetas trazan órbitas que no se cruzan, y en las tres únicas excepciones, las órbitas están en resonancia, por lo que los planetas sobreviven sin colisionar. Todos los compañeros no estelares de estrellas de tipo solar conocidos son grandes, capacitados para desviar cuerpos más pequeños en sus cercanías. El criterio del dominio dinámico los clasificaría probablemente entre los planetas.

Juego final

Un planeta es, en efecto, el producto final de la acreción en un disco que rodea a una estrella. Esta definición se aplica sólo a sistemas maduros, como el nuestro, donde la acreción ha llegado casi a su fin. En sistemas más jóvenes, con un intenso proceso de acreción todavía, los cuerpos mayores no son estrictamente planetas; reciben el nombre de embriones planetarios, y los cuerpos menores el de planetesimales.

La definición de la UAI sigue conservando el criterio de la esfe-

ricidad en el concepto de planeta, aunque, estrictamente hablando, es innecesario. La "limpieza orbital" distingue los planetas de los asteroides y cometas. La definición elimina, además, la necesidad de una masa superior que los separe de las estrellas y las enanas marrones. Las escasas enanas marrones halladas en órbitas cortas alrededor de estrellas pueden considerarse planetas; se cree que su origen reside en la acreción del disco, en lo que difieren de las enanas marrones situadas en órbitas más amplias.

En resumen, la diferencia entre planetas y otros cuerpos celestes que no lo son admite cuantificación, en la teoría y en las observaciones. Todos los planetas de nuestro sistema solar alcanzan masa suficiente para haber despejado sus zonas orbitales de la mayoría de los planetesimales originales. Hoy día, cada planeta contiene al menos 5000 veces más masa que el resto de los escombros de sus alrededores. Por el contrario, los asteroides, cometas y objetos del cinturón de Kuiper, incluido Plutón, sobreviven rodeados de objetos con tamaños equiparables a los suyos.

Contra cualquier definición de este tipo se objeta que habría que clasificar los objetos astronómicos sólo por sus propiedades intrínsecas, como el tamaño, la forma o la composición química, y no por su localización o contexto dinámico. Tal objeción olvida que a los cuerpos que giran en torno de los planetas se les considera satélites, pese a que dos de ellos son mayores que Mercurio y a que muchos consisten en asteroides y cometas capturados. El contexto y la localización revisten una importancia innegable. La distancia al Sol determinó que los cuerpos interiores se convirtieran en planetas rocosos y los exteriores llegaran a ser planetas gigantes ricos en hielos y gases volátiles.

La nueva definición distingue a los planetas, que dominan dinámicamente un vasto volumen del espacio, de cuerpos que no lo logran (asteroides, objetos del cinturón de Kuiper y embriones planetarios expulsados). Los ochos planetas son los productos finales dominantes del proceso de acreción del disco y difieren de las numerosas poblaciones de asteroides y objetos del cinturón de Kuiper.



DAVID EMMITE PHOTOGRAPHY

La definición histórica según la cual hay nueve planetas ya no conserva su atractivo sentimental. Las definiciones *ad hoc* que pretendían mantener a Plutón como planeta enmascaran los profundos cambios ocurridos desde principios de los años noventa en nuestra comprensión del origen y arquitectura del sistema solar.

Durante 76 años se ha enseñado en las escuelas que Plutón era un planeta. Algunos veían en la cultura y la tradición razones de peso para dejarlo como estaba. Pero la ciencia no puede lastrarse con errores del pasado. Para que sean útiles, las definiciones científicas han de basarse en la estructura natural del universo. Podemos y debemos revisar nuestras definiciones, siempre que sea necesario, para reflejar el conocimiento mejorado que deriva de los nuevos descubrimientos. El debate sobre la definición de planeta proporcionará a los educadores un ejemplo de libro de cómo los conceptos científicos no se graban en piedra, sino que evolucionan.

El autor

Steven Soter, del departamento de astrofísica del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, imparte en el Centro de Estudios Antiguos de la Universidad de Nueva York seminarios sobre "pensamiento científico y especulación" y "geología y arqueología del Mediterráneo".

Bibliografía complementaria

REGARDING THE CRITERIA FOR PLANETHOOD AND PROPOSED PLANETARY CLASSIFICATION SCHEMES. Presentado en la Asamblea General número XXIV de la UAI, Manchester, Reino Unido, 7-18 de agosto, 2000. S. Alan Stern y Harold F. Levison en *Highlights of Astronomy*, vol. 12, págs. 205-213; 2002.

PLANETESIMALS TO BROWN DWARFS: WHAT IS A PLANET? Gibor Basri y Michael E. Brown en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 34, págs. 193-216; 2006.

WHAT IS A PLANET? Steven Soter en *Astronomical Journal*, vol. 132, n.º 6, págs. 2513-2519; diciembre 2006.

¿Llegará lejos el etanol?

Matthew L. Wald

En la sala de equipajes del aeropuerto de Sioux Falls, en Dakota del Sur, está expuesto un monoplaza de carreras verde y blanco cuyas pegatinas indican que corre con etanol. Pero si en ese mismo aeropuerto intentase alquilar un vehículo, en el mostrador le recordarían que *no* lo cargase con E85, la mezcla de combustible con un 85 por ciento de etanol, porque los coches de alquiler no están preparados para ello y el motor quedaría inservible.

Ese aeropuerto del Medio Oeste se encuentra en la región del etanol, en el centro del actual empeño estadounidense por transformar hidratos de carbono en hidrocarburos.

El país se ha embarcado en la aventura del etanol, anticipando un cambio de combustibles sin precedentes desde que hace cuarenta años se emprendió la construcción de cientos de centrales nucleares. En agosto de 2005, con miras a reducir las importa-


El etanol
podría sustituir
a la gasolina,
pero no será
verdaderamente provechoso
mientras no sepamos
destilarlo a gran escala
de hierbas, tallos
de maíz o de paja
de los cereales, y no,
como hasta ahora,
sólo de los granos

ciones de combustible, el Congreso de Estados Unidos aprobó una importante resolución: elevar de 15.000 millones a 28.000 millones de litros la producción anual de etanol para el año 2012. [La producción europea es mucho menor; dentro de Europa, España es la principal productora de etanol.] Los analistas afirman que el objetivo se habrá cubierto mucho antes de la fecha tope, gracias al régimen de impuestos y subsidios del Gobierno, y sobre todo gracias a los elevados precios del crudo. El coste de convertir biomasa vegetal en etanol es bastante inferior a los 0,66 dólares que costaba el litro de gasolina el pasado otoño.

Según la Asociación de Combustibles Renovables, en 2006 la producción estadounidense de etanol superaba los 18.900 millones de litros. Es una cifra pequeña frente al consumo anual de gasolina y gasóleo, que hoy ronda los 530.000 millones de litros, pero ha crecido el 50 por ciento en un año. Andrew Karsner, secretario adjunto para eficiencia y energías renovables del departamento de energía, asegura que el alto precio del crudo fomenta la construcción de plantas productoras de etanol. En cierto modo, recuerda a la fiebre del petróleo que se desató en Pennsylvania por el decenio de 1850.

Pero, ¿valen la pena tales esfuerzos? Con los procedimientos de generación actuales, no. Todo el etanol combustible que se comercializa en EE.UU. procede de granos de maíz, y cuesta bastante energía producirlo. Ciertos análisis indican que refinar un litro de etanol absorbe más energía que la que proporciona su combustión. Incluso los estudios positivos sólo muestran ligeras ganancias netas. Otras investigaciones señalan que el ciclo del etanol a partir del maíz sólo reduce en muy pequeña cantidad, o nada en absoluto, la emisión de gases de invernadero con respecto a la obtención de gasolina desde el crudo.

Resumen/*Mito y realidad*

- Aunque los políticos traten de imponer el etanol obtenido del maíz estadounidense como sustitutivo del petróleo foráneo, la conversión tiene muy poco interés energético. Exige grandes cantidades de combustibles fósiles; aun cuando se destilara en etanol la cosecha estadounidense de maíz entera, sólo se obtendría un 7 por ciento del combustible de automoción consumido en el país.
- La producción de etanol a partir de maíz crea casi el mismo volumen de gases de invernadero que la producción de gasolina. La combustión de etanol en los motores de vehículos apenas reduce la contaminación.
- La obtención de etanol desde la celulosa —contenida en los tallos de maíz y en las pajas de cereales y hierbas— consume mucho menos combustible fósil que el etanol derivado de los granos de maíz. Pero no resulta fácil lograr que las enzimas naturales que requiere la conversión se multipliquen y operen dentro de los grandes biorreactores propios de una producción industrial. Se están descubriendo organismos más prometedores; de su éxito depende la viabilidad del etanol a largo plazo.

El etanol no se justificará en el plano económico ni ambiental mientras no se perfeccionen métodos de refino a partir de la celulosa, no del grano. La celulosa es la materia leñosa que constituye el tallo, el cormo o el tronco de vegetales que pueden cultivarse y cosecharse con menos energía. Aunque se conocen los procesos biológicos para la conversión de los azúcares encerrados en la celulosa, los fabricantes que intentan destilar etanol a partir de esas sustancias aún no han alcanzado la viabilidad comercial. La caña de azúcar es la fuente vegetal ideal, mucho más rica en los azúcares originarios del etanol que los tallos de maíz y herbáceas. Sin embargo, ni el clima ni el coste de la mano de obra en Estados Unidos permiten explotar ese cultivo como en Brasil.

Para hacer practicable la producción de etanol desde la celulosa se requerirán avances agrícolas y grandes mejoras del tratamiento industrial. De no ser así, el etanol seguirá siendo un producto embarazoso con poco beneficio neto. Y continuará la dependencia del petróleo importado.

¿Renovable? En realidad, no

La mayor parte del etanol producido en EE.UU. se vende como aditivo de la gasolina. Puede incorporarse hasta en un 10 por ciento, máximo que pueden tolerar sin deterioro los motores ordinarios. En ciertas zonas, sobre todo en las regiones agrícolas, es posible encontrar el E85, que contiene un 85 por ciento de etanol y un 15 por ciento de gasolina sin plomo. Esta mezcla requiere motores "de combustible flexible", diseñados para tolerar la mezcla. Si no fuera así, el etanol —el mismo tipo de alcohol de los licores destilados— atacaría las juntas del motor y la distribución de combustible. Millones de vehículos están equipados así (aunque muchos de sus dueños lo ignoren), pero el E85 se vende en Estados Unidos sólo en unos centenares de estaciones de servicio [a finales de 2006 entraba en funcionamiento un surtidor público de E85 en un concesionario de Madrid], y su cadena de suministro crece con lentitud.

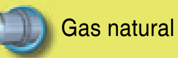
No obstante, la destilación de etanol desde el maíz en parte se debe al fuerte apoyo bicameral de ambos partidos en Washington, D.C. Cuenta también con el respaldo de quienes, siendo ajenos a la agricultura, creen que el país debería ser menos dependiente del petróleo importado. Los partidarios aducen que el etanol es un combustible renovable, porque el maíz puede cosecharse año tras año. Según la Asociación de combustibles renovables, el consumo anual de 28.000 millones de litros por año equivale a disminuir en 179 millones de barriles la importación de crudo extranjero. Con otras palabras, las importaciones de unos 15 días: un punto de partida, aunque no una panacea.

Pero hay otros aspectos del etanol a tener en cuenta. El primer inconveniente es que un barril estándar (42 galones o 159 litros) de etanol presta el mismo servicio que unos 28 galones (106 litros) de gasolina, ya que el galón de etanol solamente proporciona 80.000 BTU (unidad térmica británica), unas 20.000 kcal, frente a las 119.000 BTU que daría un galón de gasolina sin plomo. Por tanto, un depósito lleno de E85 se agota un 33 por ciento antes. Aunque el litro de etanol fuese más barato

DON FOLEY

COMBUSTIBLE CONSUMIDO


Gasóleo


Gas natural

DEL POZO A LA RUEDA: FABRICACION DEL COMBUSTIBLE

Se requieren muchas etapas para convertir el crudo en gasolina y el maíz en etanol y conducir ambos combustibles a los surtidores. Ciertas etapas tienen un fuerte consumo de energía en combustibles fósiles.

Cultivo de maíz

Extracción de petróleo

Alimentación del ganado

Transporte del maíz

Producción del fertilizante

Secadero de subproductos

Oleoducto

Producción de etanol

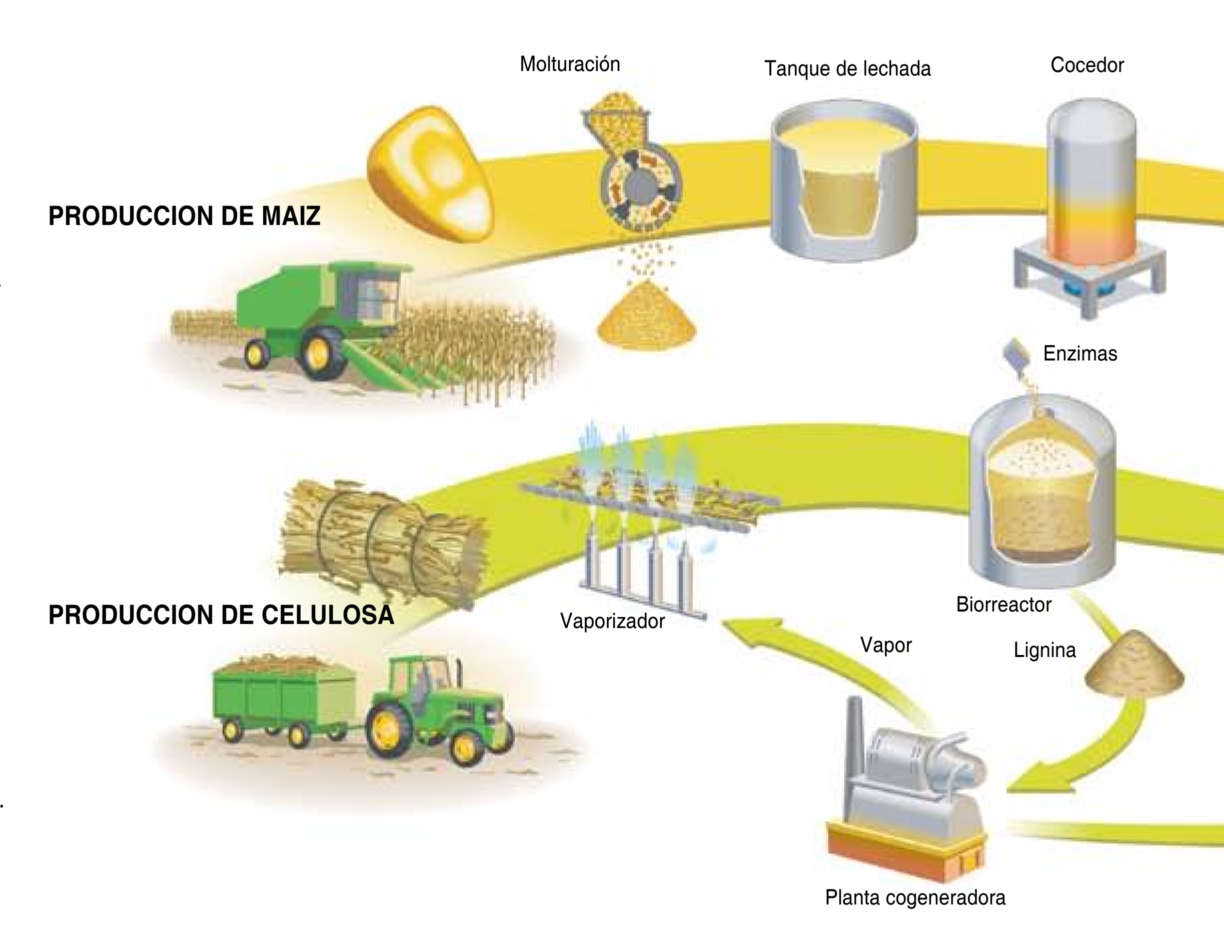
Refino

Transporte del etanol

Transporte de la gasolina

ETANOL DE LOS GRANOS O DE LOS TALLOS

Las etapas iniciales para convertir maíz o celulosa en etanol difieren notablemente. El maíz se recoge, se hierve y se amasa antes de entrar en un fermentador. La celulosa se trata al vapor para descubrir las fibras que las enzimas convierten en azúcares en un biorreactor. Todavía se buscan reacciones biológicas eficientes a gran escala, pero queda como ventaja la lignina residual, cuya combustión puede generar a la vez vapor y electricidad. La destilación de una u otra materia prima crea subproductos que pueden convertirse en alimento para el ganado.



en el surtidor, habría que comprar muchos más litros para recorrer la misma distancia.

El otro inconveniente es que EE.UU. carece de algunos de los recursos necesarios para producir etanol. Es cierto que los cultivos de maíz son abundantes y se extienden en todas las direcciones alrededor del aeropuerto de Sioux Falls. Pero la fabricación de etanol requiere gas natural en grandes cantidades, en un proceso muy parecido a la destilación de alcohol para licores. La levadura hace fermentar el azúcar y produce alcohol y dióxido de carbono. El resultado se destila mediante la evaporación del alcohol y su posterior captura y recondensación. El gas natural se utiliza para el calentamiento en diversas etapas. La producción de un galón de etanol, con sus 80.000 BTU de energía, requiere actualmente alrededor de 36.000 BTU de gas natural.

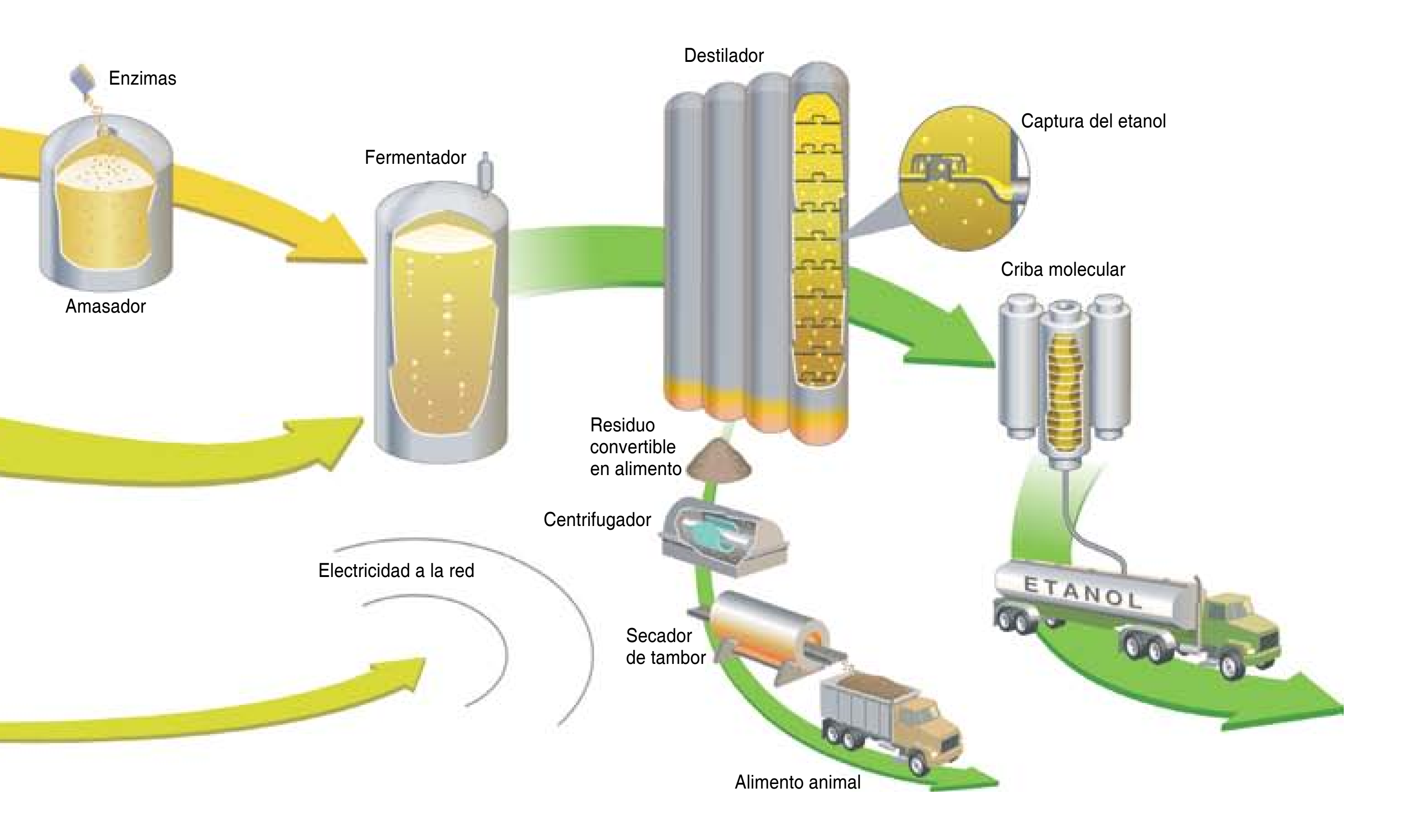
En los años noventa, cuando el Congreso de los Estados Unidos se propuso fomentar las economías de las regiones agrarias de la nación mediante leyes que alentaban la producción de etanol, el gas natural costaba poco, en torno a 3 dólares por millón de BTU. El invierno pasado el precio llegó a los 14 dólares. Más aún, la fuerte presión de la demanda encarece el gas para todos.

Aunque los partidarios del etanol afirmen que su combustible se encuadra en un futuro sostenible de la energía, tal consumo de gas natural quizá no pueda aguantarse ni siquiera en el presente. La producción en EE.UU. desciende, y la de Canadá no basta para cubrir el consumo. Resulta paradójico que, para fabricar etanol "nacional", haya que aumentar las importaciones de gas natural.

Como alternativa, ciertos productores de etanol recurren al carbón, que nadie definiría como limpio y renovable. Al quemar carbón se desprende tal cantidad de dióxido de carbono, que conducir con ese tipo de etanol agravaría el cambio climático, más que utilizar gasolina. En teoría, el calor necesario para la destilación podría obtenerse de energía eléctrica comprada, pero entonces muchas compañías eléctricas de EE.UU. tendrían que quemar más carbón y gas natural para satisfacer la demanda.

El uso de etanol requiere energía por otros conceptos también. El más obvio es el gasóleo consumido por los camiones que transportan etanol al mercado, a veces a distancias muy largas, porque el etanol, a diferencia de la gasolina y el gasóleo, no puede llevarse por oleoductos, que se contaminan fácilmente con agua. El agua no se mezcla con la gasolina o el gasóleo pero sí con el etanol, degradándolo como combustible. También consumen gasóleo las cosechadoras del maíz. Y el propio

GEORGE RETSECK



maíz suele abonarse con productos químicos en cuya fabricación se ha utilizado gas natural.

Estas consideraciones son esenciales para el cálculo de un "balance energético neto" del etanol. Las cifras están sometidas a un intenso debate. David Pimentel, profesor de agricultura de la Universidad de Cornell, aseguró en 2005 que obtener un litro de etanol consume más energía que la generada con su combustión. Se le criticó que hubiera asignado un valor demasiado bajo a los subproductos, algunos de los cuales servirían para alimentar el ganado (evitando tener que cultivar más maíz), y que había cargado al etanol costes que le eran ajenos, como los de las comidas de los trabajadores de las plantas de etanol. Pero hay consenso entre los analistas: aun cuando el valor energético neto del etanol sea positivo, lo es por un pequeño margen. En ese mismo año, un extenso estudio del Instituto Norteamericano de Ciencias Biológicas llegó a la conclusión de que el etanol de maíz sólo daba un 10 por ciento más de energía que la consumida en su producción. Este balance neto contrastaba con el 370 por ciento que se obtiene de la caña de azúcar cosechada en Brasil.

Michael Wang, del Centro de Investigación del Transporte del Laboratorio Nacional de Argonne, ha calculado que producir un millón de BTU de etanol requiere 740.000 BTU de combustibles fósiles, consideradas todas las etapas del proceso: abono de suelos, cosecha del maíz, destilación de su almidón en alcohol, etcétera. Se promociona el etanol como producto agrícola, pero en gran medida depende de combustibles fósiles.

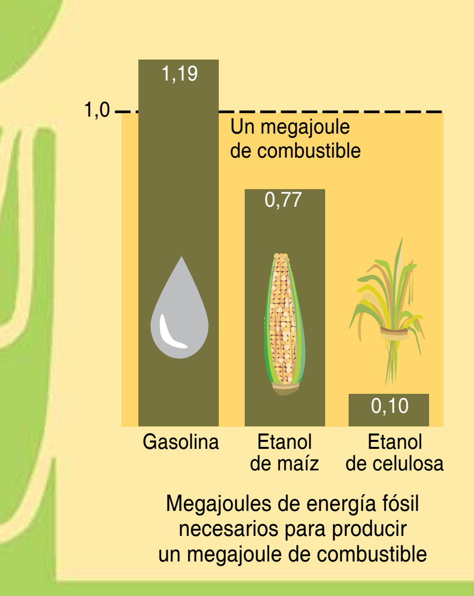
Las ventajas del etanol en cuanto a los gases de invernadero son menores incluso. En enero de 2006, Alexander E. Farrell, profesor ayudante de energía y recursos naturales de la Universidad de California en Berkeley, calificaba en *Science* de "ambiguo" el efecto del etanol sobre estas emisiones. Tras examinar diversos estudios, concluía que el etanol fabricado con gas natural apenas si es mejor que la gasolina en lo que se refiere a su contribución al calentamiento global; y el fabricado con carbón, es peor que la gasolina. La combustión de un galón (casi 4 litros) de gasolina desprende unos 9 kilogramos de dióxido de carbono, contando las emisiones del motor del vehículo y las de la refinería. Hay cierta discrepancia sobre la cifra correspondiente al etanol, pero varía de ligeramente mejor a ligeramente peor, dependiendo de cómo se obtenga el etanol. No tiene mucho sentido recomendar el cambio a etanol para limitar las emisiones de gases que alteran el clima.

PRODUCIR COMBUSTIBLE CUESTA COMBUSTIBLE

Para producir gasolina y etanol, si se consideran todas las etapas, desde la perforación o el cultivo hasta la distribución final, se queman combustibles fósiles (gas natural, petróleo y carbón) en muy diferentes cantidades. Las cifras ilustradas son valores medios, deducidos de seis estudios de investigadores del Instituto de Tecnología de California.



EL *JUNGLE ROT* de Guam (hongo *Trichoderma reesei*) ayuda a descomponer la celulosa en azúcares que destilan etanol con facilidad.



Megajoules de energía fósil necesarios para producir un megajoule de combustible

¿Ciclo vital o ciclo político?

Por desgracia, no parece que el gobierno federal, ni al promulgar en 2005 la "norma sobre combustibles renovables" para 2012, ni al rebajar los impuestos del etanol en 51 centavos por galón (unos 11 céntimos de euro por litro), haya tomado en consideración el balance energético, ni la contaminación. Un funcionario federal con larga experiencia en materias de energía y contaminación opina que el Congreso no ha hecho un análisis del ciclo vital, sino que ha adoptado el de Archer Daniels Midland, gran productor agrícola que lleva años detrás de que se promueva el etanol.

Da la impresión de que el análisis del ciclo vital de los combustibles es idea nueva para quienes establecen la política energética. Por primera vez, en lugar de basarse sólo en los precios para calcular los réditos de convertir BTU de bajo valor en BTU de alto valor (como al convertir carbón en electricidad o petróleo crudo en gasolina), se están empezando a tomar en cuenta las pérdidas de energía y las emisiones contaminantes a lo largo de todo el proceso.

Otra cosa es, sin embargo, saber si la política atenderá estas nuevas evaluaciones. Por ejemplo, una amplia coalición de defensores de los biocombustibles, energías eólicas y solares han formado un grupo denominado "25 × 25". Pretenden que el 25 por ciento de la energía consumida en el país hacia 2025 se obtenga de fuentes renovables. Docenas de congresistas respaldan al grupo, pero cuando presentaron la organización en Washington la primavera pasada, sus dirigentes ni siquiera pudieron señalar cuál sería la fuente más importante: eólica, solar, combustión de etanol o combustión directa de biomasa. Había pocas ganas de enturbiar con aritmética los conceptos.

Parte del repentino interés por el etanol es consecuencia imprevista de una política fracasada que pretendía jugar con la composición de la gasolina. En el decenio de los ochenta, algunos estados del país empezaron a exigir determinados niveles de oxígeno en la gasolina, en un intento —mal orientado— de purificar la combustión en los motores de coches. Pero la mayoría de los refinadores respondieron añadiendo éter metil terciario butílico (MTBE) —y no etanol— a la gasolina. (Los críticos afirmaron que el móvil político oculto era ayudar a los estados agrícolas favoreciendo el uso del etanol.) Durante los años siguientes, se descubrió que siempre que se filtraba gasolina en el suelo, el MTBE, posible carcinógeno, llegaba fácilmente al agua potable local.

En la Ley de Energía de 2005, el Congreso suprimió la norma que alentaba el MTBE, y los refinadores dejaron de utilizarlo para evitar posibles responsabilidades. Pero necesitaban otro sustituto de alto octanaje y temían que volvieran a exigirse niveles de oxígeno específicos. Por eso recurrieron apresuradamente al etanol. Sucedía, además, que las refinerías de petróleo en EE.UU. se habían quedado pequeñas, de modo que la adición de etanol aumentaba el volumen de gasolina producida, eludiéndose así la necesidad de construir nuevas y costosas plantas.

El tallo, no la mazorca

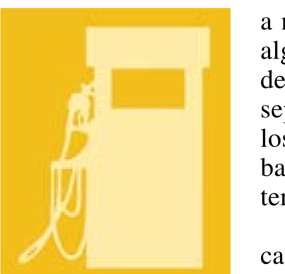
Otro problema fundamental amenaza el plan actual de producción de etanol: el maíz. En este momento hay exceso de cosecha. Con todo, apenas si da para satisfacer una parte apreciable de las apetencias de combustible nacionales.

En carta dirigida al senador John McCain de Arizona en febrero de 2005, Pimentel señalaba que la producción de 3400 millones de galones de etanol (casi 13.000 millones de litros) estaba consumiendo alrededor del 14 por ciento de la cosecha estadounidense de maíz; con esas mismas proporciones, la cosecha entera sólo suministraría el 7 por ciento del combustible necesario para automoción. Aunque se recolectara mucho más, los agricultores de EE.UU. nunca podrían acercarse a las cantidades exigidas para aprovisionar de combustible a la nación. Y los oponentes alegan que cualquier expansión de la agricultura debería servir para aumentar

DANIELA NAOMI MOLNAR; FUENTE: INSTITUTO TECNOLOGICO DE CALIFORNIA (*gráfica*); CENTRO DE INVESTIGACION TECNICA VTT DE FINLANDIA (*microfotografía*)

las exportaciones o dar de comer a los hambrientos del mundo.

Una solución sería obtener etanol de la celulosa. Hay celulosa en el tallo de la planta de maíz, la paja de los cereales y el tallo de otras plantas que no suelen recolectarse, como ciertas hierbas de crecimiento rápido. Hay mucha más celulosa que granos de maíz; según el Departamento de Agricultura y otras fuentes, una recolección masiva de celulosa a escala nacional generaría suficiente etanol para reemplazar un tercio de la gasolina consumida en EE.UU.



En lo que se refiere a la energía, la destilación de etanol a partir del azúcar de la celulosa y no del maíz es doblemente ventajosa. En primer lugar, la propia celulosa puede considerarse casi "gratuita", porque lleva muy poco trabajo recoger los tallos y no hay que añadir abono. Los agricultores dicen que es preciso remover el suelo bajo algunos de los tallos, mazorcas y hojas para revigorizar la tierra, pero la mayor parte de esta materia vegetal es cosechable. El panizo (*Panicum virgatum*) es la hierba que mejor se presta a la destilación de etanol y requiere mínimas dosis de fertilizantes.

Como segunda ventaja, tras eliminar el azúcar queda como residuo un material leñoso, la lignina, que arde bien. Iogen Corporation, de Ottawa, líder de la investigación sobre etanol celulósico en Norteamérica, predice que, cuando construya una factoría a escala comercial, obtendrá de la combustión de lignina un exceso de energía suficiente para hervir agua y generar electricidad. En vez de sustraer parte de las cosechas alimentarias para producir combustible, el etanol inicia su proceso en desechos agrícolas y lo termina en dos productos comerciales: combustible para el transporte y energía eléctrica. Con el etanol de celulosa, las emisiones netas de dióxido de carbono por kilómetro son casi nulas, o quizá negativas, siempre y cuando la electricidad coproducida sustituya al carbón o al gas natural en una central térmica.

La lignina desprende dióxido de carbono al arder. Por otro lado, las nuevas plantaciones de maíz o de panizo consumen gases. Los optimistas, como los de Iogen, quieren adaptar el método a forrajes cada vez menos costosos, e incluso piensan en procesar la celulosa del papel desechado.

Subsisten, sin embargo, los problemas. El más importante estriba en domesticar uno de los procesos naturales que degradan la celulosa; los azúcares encerrados en la fibra no pueden destilarse hasta etanol hasta que no se hayan liberado de la lignina. Para ello se necesitan enzimas sintetizadas por bacterias u hongos. Las bacterias implicadas habitan en lugares incómodos, como la maleza de selvas lejanas o las tripas de una termita, y resultan más difíciles de dominar que las levaduras. Cuesta mucho que se multipliquen en un tanque de acero inoxidable de 8000 litros (un medio insólito para ellas), así como controlar su actividad en las cantidades industriales necesarias para mantener dentro de ese espacio la conversión en etanol.

Varias compañías han logrado que funcionen sus procesos patentados, pero no parece que ninguna haya demostrado viabilidad suficiente para obtener préstamos. Pese a no haber detallado sus problemas técnicos, algunas de ellas se quejaron, en un seminario de la Cámara de Representantes del pasado septiembre, de que no lograban convencer a los proyectistas de que garantizasen ante los bancos que la planta de producción, una vez terminada, funcionaría.

Se están ensayando organismos que ofrezcan mejores opciones. Iogen explota en su proceso un hongo procedente de Guam al que los científicos de la casa denominan "*jungle rot*" ("podrido de jungla"), y ha manipulado el ADN de ese organismo para que produzca mayores cantidades de la enzima necesitada. Otros utilizan enzimas sintetizadas por setas. Honda anunció el postrer otoño que tal vez haya descubierto un nuevo microorganismo válido para ese fin. Agrivida, en Cambridge, Massachusetts, ensaya la creación, mediante bioingeniería, de un maíz que contenga enzimas que faciliten su descomposición en etanol.

De todos modos, el Secretario de Energía de EE.UU., Samuel Rodman, declaró el pasado septiembre que dentro de cinco años podría haber técnicas comercialmente viables. Los generosos incentivos del Gobierno deberían atraer a más empresas, aunque ninguna parece muy dispuesta a producirlo a escala comercial. [Un cinco por ciento de la producción de etanol de la planta de biocarburantes de Castilla y León, en Babilafuente, Salamanca, inaugurada en 2006, procederá de la paja; el otro 95 por ciento, de grano de cereal; (*véase* "Bioetanol", de Mercedes Ballesteros; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2006.)]

Entre tanto, depender del etanol obtenido del maíz no es una estrategia sostenible. La agricultura nunca ofrecerá una cosecha que se aproxime al nivel necesario, su transformación en etanol no combate el calentamiento global y socialmente puede parecer que se está quitando comida a quienes la necesitan [se ha achacado el aumento del precio de las tortillas en México en 2006 y 2007 a que la producción de maíz se esté derivando hacia el mercado del etanol.] Los defensores del etanol de maíz aducen que constituye un puente hacia el etanol de celulosa, pero por ahora el puente no lleva a parte alguna.

El autor

Matthew L. Wald se viene ocupando desde 1979 de temas relacionados con la energía.

Bibliografía complementaria

ETHANOL FUELS: ENERGY BALANCE, ECONOMICS, AND ENVIRONMENTAL IMPACTS ARE NEGATIVE. David Pimentel en *Natural Resources Research*, vol 12, n.º 2, págs. 127-134; junio de 2003.

UPDATED ENERGY AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS: RESULTS OF FUEL ETHANOL. Michael Wang en el 15º Simposio Internacional sobre combustibles de alcohol, 26-28 de septiembre, 2005.

PLAN B 2.0: RESCUING A PLANET UNDER STRESS AND A CIVILIZATION IN TROUBLE. Edición ampliada y puesta al día. Lester R. Brown. W. S. Norton, 2006.

Ribointerruptores

El descubrimiento de estas reliquias procedentes de un mundo ya extinto en el que predominaban las moléculas de ARN puede abrir nuevas vías para el desarrollo de tratamientos médicos

Jeffrey E. Barrick y Ronald R. Breaker

En otoño de 2000, una cuestión relacionada con el metabolismo bacteriano de las vitaminas atrajo nuestra atención. Alentados por el creciente número de pruebas que respaldaban una teoría sugestiva sobre las formas de vida terrestres más primitivas, y apoyados en nuestra experiencia en la construcción de interruptores biomoleculares, nos propusimos resolver el enigma. Los resultados superaron las expectativas: descubrimos una nueva forma de autorregulación celular basada en una de las moléculas más antiguas de nuestro entorno, el ácido ribonucleico (ARN).

Considerado largo tiempo un modesto mensajero, el ARN podría gozar de notable autoridad y de mecanismos refinados para ejercerla. Aunque no se han determinado las funciones de estas moléculas de ARN recién descubiertas, quizá proporcionen nuevas armas para combatir las enfermedades. Pensemos que muchas bacterias patógenas se basan en los ribointerruptores para controlar aspectos fundamentales de su metabolismo.

El hecho de que esta forma arcaica de autorregulación persista en los organismos modernos da fe de su importancia. Las células bacterianas son factorías de productos químicos increíblemente adaptativas y autosuficientes, dedicadas a la fabricación de un producto final: infinitas copias de sí mismas. Pero las únicas cepas que han sobrevivido durante todo este tiempo son las que se mostraron capaces de mantener tan acelerada cadena de descendencia, pese a encontrarse sometidas a una feroz competencia por los recursos de un entorno cambiante.

Control del inventario

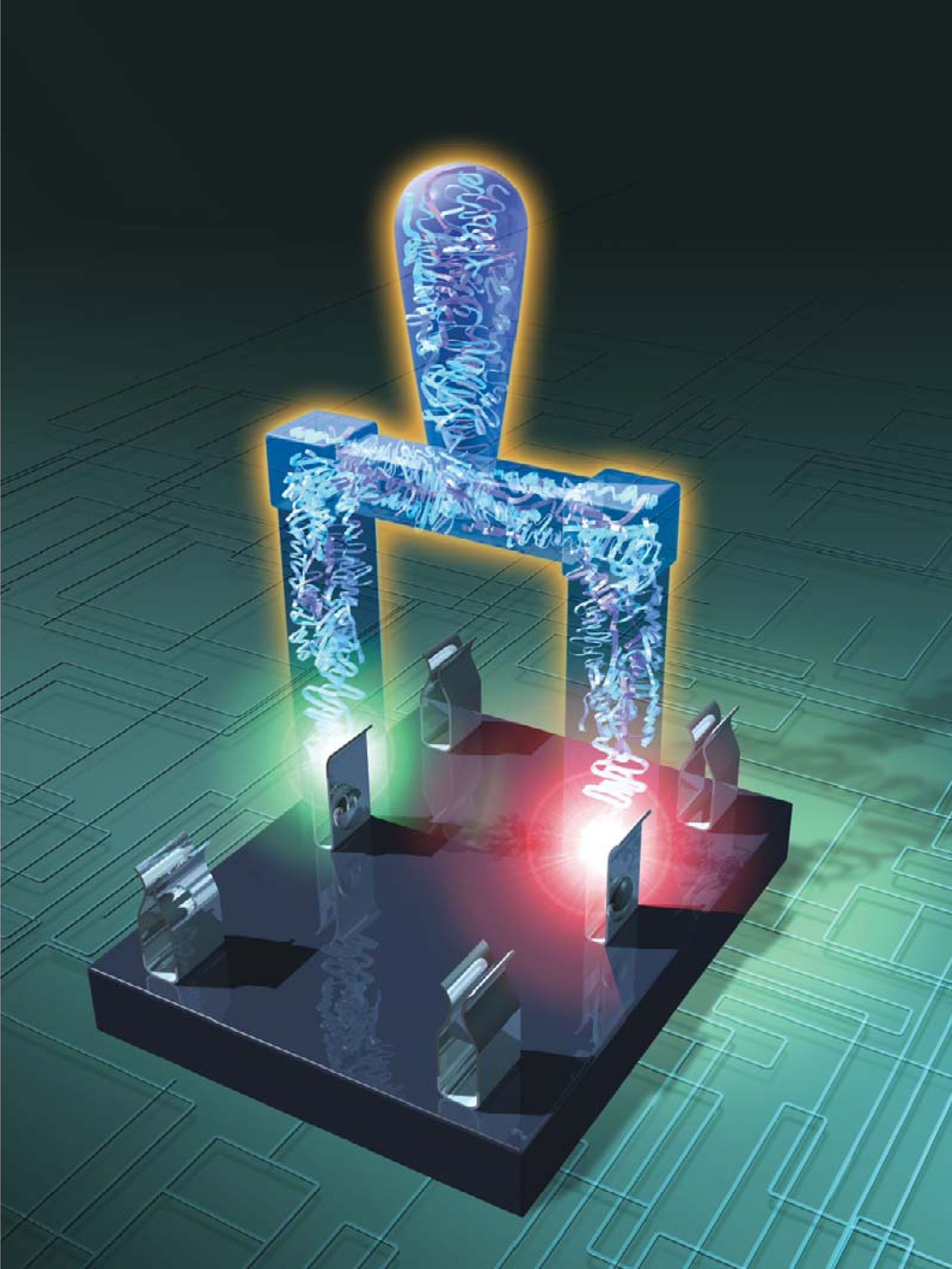
La capacidad que posee una bacteria para generar los centenares de moléculas complejas necesarias para replicarse a sí misma en veinte minutos escasos radica en el genoma de ADN de doble hebra que cada organismo copia fielmente de generación en generación. Este manual de instrucciones está escrito con los cuatros nucleótidos que componen el alfabeto del ADN: las bases nitrogenadas adenina, timina, citosina y guanina, engarzadas sobre un esqueleto en el que se van alternando una molécula de azúcar y una de fosfato.

En una bacteria, puede llegar a ser del 90 por ciento la fracción del ADN dedicada a codificar las instrucciones para el ensamblaje de la maquinaria proteica que acelera y organiza las etapas metabólicas necesarias para la construcción, *ex novo*, de una nueva célula.

En la planta de producción celular, el proceso comienza cuando las enzimas ARN polimerasas se adhieren al ADN genómico y empiezan a copiar segmentos de su texto en forma de moléculas similares de ARN mensajero (ARNm). Las células bacterianas tienen tanta prisa, que en cuanto una polimerasa ha iniciado la lectura del mensaje de ADN y su transcripción, se presenta otra polimerasa, presta a acometer la copia siguiente de ARNm. La mayoría de los mensajes codifican una proteína; algunos, los operones, portan, sin embargo, instrucciones para sintetizar un conjunto entero de proteínas cuyas funciones están relacionadas.

El ARN es químicamente menos estable que el ADN; las células bacterianas utilizan los múltiples transcritos de ADN como si se tratara de fotocopias en papel. Los ARNm que no se utilizan se destruyen y reciclan con prontitud, para que sólo las órdenes de trabajo recientes lleguen a los ribosomas, los operarios de la factoría encargados de la síntesis de proteínas.

Diríase que los ribosomas tienen prisa también. A la manera de un tren de vagonetas, se disponen en fila, dispuestos a comenzar a leer y ejecutar las instrucciones del ARNm, antes incluso de que la polimerasa haya completado el transcrito. Se desplazan a lo largo de la molécula de ARNm: en secuencia, van descodificando cada triplete de nucleótidos en un aminoácido específico para incorporarlo a una cadena en crecimiento. A medida que va emergiendo del ribosoma la proteína en cuestión, se enrolla sobre sí misma y adopta una estructura tridimensional compleja. Se obtiene así una nueva pieza de la maquinaria, lista para comenzar a cumplir su función.



Para que la fabricación de productos químicos siga su curso sin problemas, la célula depende de dos tipos de proteínas: los transportadores, que suministran las materias primas, y las enzimas, que catalizan las sucesivas transformaciones de estas materias que tienen lugar durante los vertiginosos ciclos y rutas metabólicos. Pero reparemos en que las bacterias no malgastan recursos creando infraestructuras superfluas; antes bien, poseen mecanismos de control que interrumpen el trasiego de órdenes de trabajo hacia la maquinaria de síntesis en respuesta a los cambios de las necesidades de nutrientes o a su disponibilidad. Fue el conocimiento sobre el modo en que operan tales supervisores celulares lo que motivó nuestro interés por el metabolismo de las vitaminas.

Las bacterias se sirven de varias proteínas para comprobar, en todo momento, los restos de materias primas; ajustan el número de transportadores y enzimas destinados a cada una de las distintas líneas de producción. Por botón de muestra, el represor Lac de la bacteria intestinal *Escherichia coli* corresponde a un complejo proteico que bloquea el acceso a la región del ADN que contiene las instrucciones para fabricar dos moléculas (un transportador que bombea el azúcar lactosa hacia el interior de la célula y una enzima que descompone la lactosa para que pueda utilizarse de combustible) mientras no se requieran. Cuando la concentración de lactosa aumenta por encima de un umbral, el complejo Lac se disocia del molde de ADN, de forma que se restablece la transcripción de los genes correspondientes.

Existe un mecanismo de regulación similar controlado por supervisores proteicos que deciden qué hacer con las hebras del ARNm conforme se van copiando a partir del ADN. En la bacteria *Bacillus subtilis*, hallamos un complejo proteico, el TRAP, que controla un operón codificador de enzimas para la síntesis del aminoácido triptófano y otro que corresponde a un transportador de triptófano. Cuando TRAP detecta que estas proteínas han dejado de ser necesarias, enrolla firmemente sobre sí mismo el extremo puntero (o guía) de la molécula de ARNm que porta las instrucciones para fabricarlas. Ello impide que un ribosoma localice en el transcrito para el transportador un lugar apropiado de inicio de la traducción. El aislamiento del extremo puntero provoca que la hebra de ARNm que se está sintetizando adopte forma de horquilla (cuyos brazos se mantienen juntos mediante nucleótidos unidos entre sí); con semejante configuración, se da por acabada antes de tiempo la transcripción del mensaje.

Además de este dispositivo para regular la producción de la maquinaria proteica celular básica, las bacterias cuentan con una caja de herramientas bien abastecida para fabricar productos químicos más exóticos. Sea el caso de las vitaminas. Los humanos hemos de obtener de la ingesta las vitaminas requeridas; las bacterias, en cambio, las sintetizan a partir de cero. Buena parte de las vitaminas más complejas son variantes de las "coenzimas", que, como su nombre indica, corresponden a pequeñas moléculas que colaboran con las enzimas proteicas. Constituyen herramientas de precisión, una suerte de broca para diamantes con poderosas funciones químicas. En la fabricación de coenzimas a partir de las materias primas intervienen rutas metabólicas de suma importancia. Las bacterias ahorrativas controlan de forma estricta una síntesis tan cara: cuando no hay demanda de coenzimas, la desconectan.

A finales del decenio de los noventa, los científicos que investigaban la regulación de la síntesis de ciertas coenzimas en bacterias reconocieron un patrón molecular que guardaba semejanza con los sistemas de represión TRAP y Lac. Pero sus intentos por identificar las proteínas supervisoras responsables de detectar la concentración de cada coenzima y de controlar la transcripción o traducción del ARNm resultaron infructuosos.

Se planteó entonces una cuestión aún más profunda: si el control no se realizaba mediante hipotéticos supervisores de naturaleza proteica, ¿cómo detectaba la maquinaria celular el nivel de estos nutrientes? La respuesta inesperada llegó del trabajo de quienes laboraban en otras aplicaciones de las moléculas de ARN. Para comprender cómo sucedió, repasemos brevemente el ribosoma.

El legado del mundo del ARN

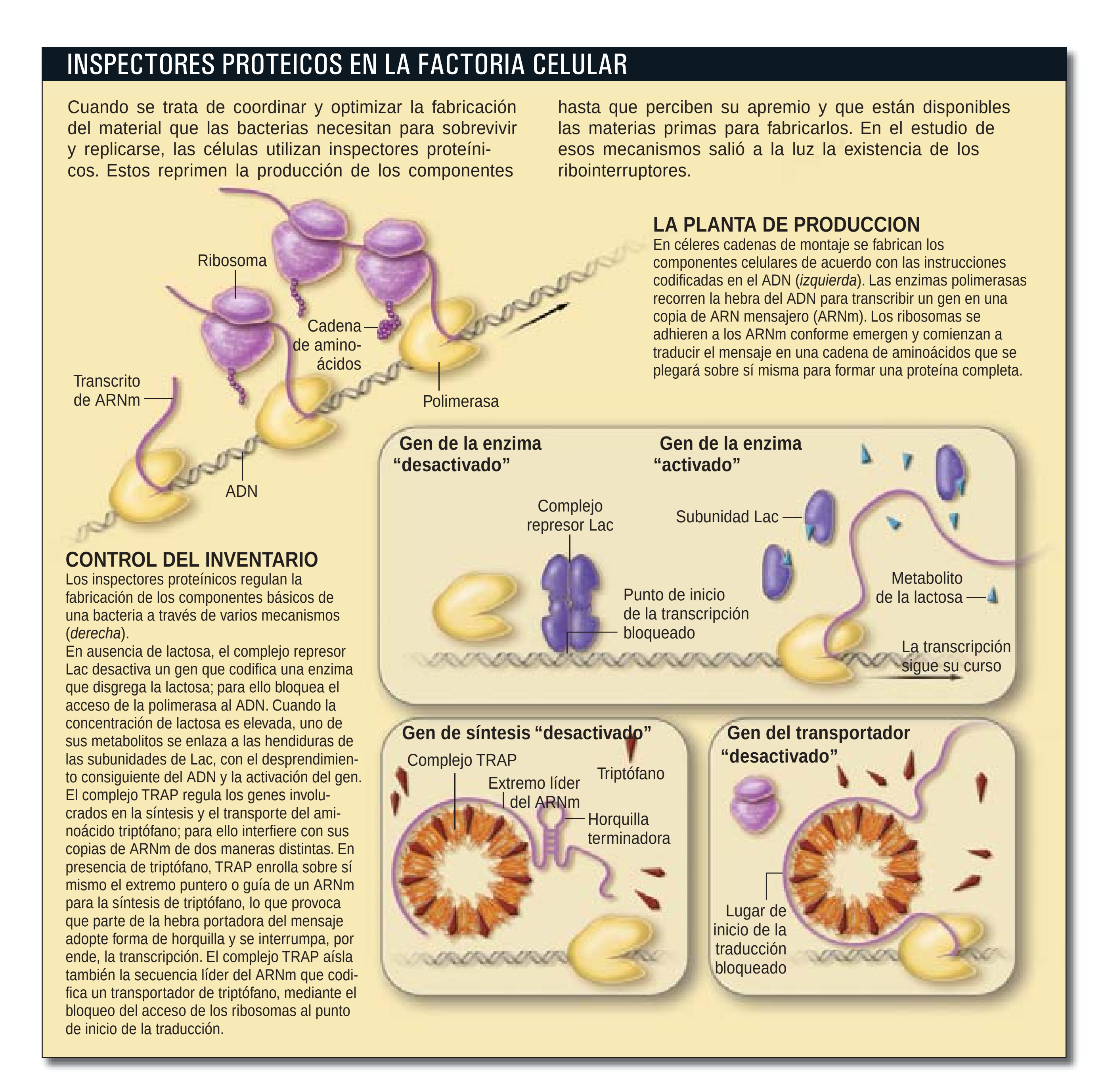
Las proteínas vendrían a ser las ruedas, engranajes, rampas y correas de transmisión que transportan y convierten las materias primas en nuevas células. Pero no toda la maquinaria esencial de la fábrica consta de proteínas. Una de las características principales del ribosoma reside en su núcleo interno, formado por los mismos nucleótidos que componen los mensajes de ARNm que lee.

Aunque el transcrito de ARN ribosómico (ARNr) emerge a partir de los planos de ADN como si se tratara de la cinta de un teletipo, difiere del ARNm en que carece de instrucciones para la fabricación de otras moléculas. Antes bien, el ARNr se pliega inmediatamente sobre sí mismo: ciertas bases nucleotídicas de su interior se unen entre sí hasta que la molécula adopta forma de horquilla terminadora.

El plegamiento del ARN ribosómico se produce a una escala mucho mayor; en él intervienen diversas subunidades, que se refuerzan me-

Resumen/*Interruptores de ARN*

- De la regulación de la actividad génica se encargan supervisores proteínicos. No siempre, empero. Ciertas bacterias utilizan ARN mensajeros para inspeccionar infraestructuras celulares cruciales.
- Algunas formas de ARN con facultades similares a las de las proteínas avalan la teoría de un mundo primordial gobernado por ARN.
- Se ha descubierto un grupo de moléculas de ARN que portan mensajes transcritos desde el ADN y, al propio tiempo, toman decisiones sobre si esas instrucciones deben o no ejecutarse. Se trata de los ribointerruptores.
- Los ribointerruptores regulan procesos fundamentales en varios microorganismos; ello les convierte en dianas potenciales para nuevos fármacos antimicrobianos.



diante sutiles modificaciones químicas. Amortiguadores y remaches proteicos reparan las grietas y recubren la superficie. Pero los estudios estructurales con resolución atómica han puesto de manifiesto que el núcleo del ribosoma, responsable de catalizar la formación de nuevos enlaces entre aminoácidos, consta exclusivamente de ARN.

El hallazgo de una estructura de ARN con la capacidad catalítica de una proteína resultó excitante para cualquiera que estuviese familiarizado con la teoría sobre el origen de la vida, que avanzó a finales de los años setenta Harold White III, de la Universidad de Delaware. White había observado que numerosas coenzimas de interés poseían curiosos componentes de ARN en su estructura química. La adenosil cobalamina (vitamina B_{12}), por ejemplo, contiene un nucleótido de ARN completo; la tiamina pirofosfato (vitamina B_1) incluye un fragmento del esqueleto azúcar-fosfato. Estos fragmentos nucleotídicos parecen funcionar a modo de asideros a los que se unen las proteínas. Según White, corresponderían a vestigios de una época primordial en la que las protocélulas no habían desarrollado todavía las formas actuales de almacenamiento de ADN o síntesis de proteínas. Ocurría, por el contrario, que el ARN llevaba a cabo una doble tarea: operaba como molécula para el almacenamiento de la información y como biopolímero capaz de plegarse para convertirse en una máquina metabólica y ejecutar las complejas tareas que hoy en día son, por regla general, patrimonio de las proteínas.

A principios de los años ochenta, se habían descubierto dos ejemplos “vivos” de estos elementos del ARN arcaicos. Uno de ellos, la ARNasaP, corresponde a una molécula de ARN bacteriana que fragmenta los transcritos de ARN inmaduros. Otro avan-

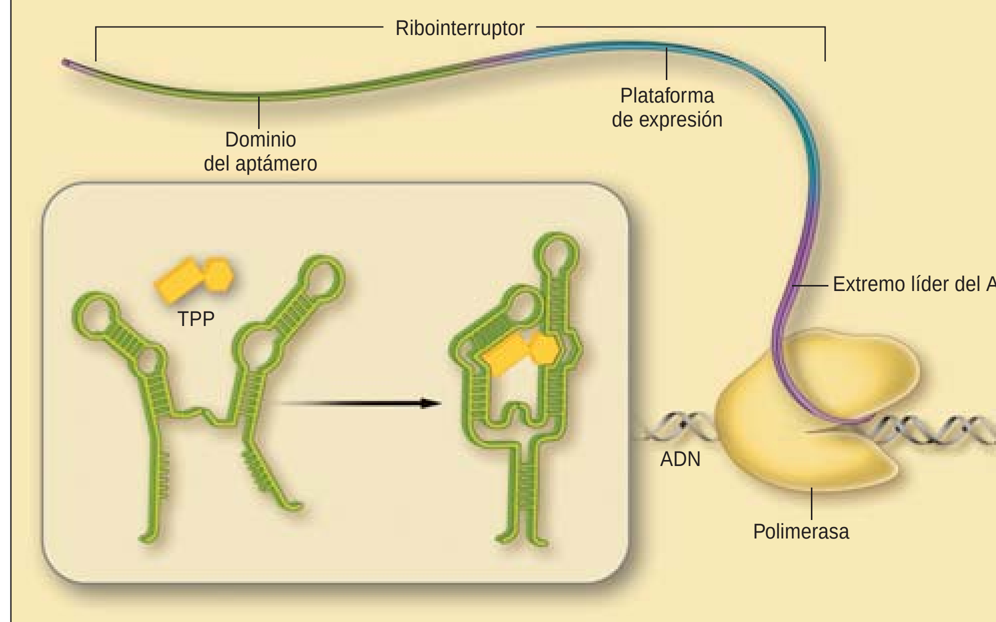
TAMI TOLPA

ce épico consistió en la identificación de unas secuencias de ARN fascinantes: se modificaban a sí mismas a partir de un transcrito de ARNm de mayor longitud y procedían a la autofragmentación mediante una serie de intercambios de enlaces químicos. Sidney Altman, de la Universidad de Yale, y Thomas R. Cech, de la Universidad de Colorado en Boulder, recibieron el premio Nobel de química en 1989 por sendos hallazgos independientes, que demostraron que las moléculas de ARN (previamente consideradas meros mensajeros pasivos) adoptaban estructuras tridimensionales complejas y aceleraban las reacciones químicas, exactamente igual que las enzimas proteicas. Estas enzimas de ARN (incluidos los ribosomas) se denominan ribozimas.

A principios de los noventa, las herramientas para la manipulación *in vitro* de biomoléculas habían madurado lo suficiente como para que los investigadores pudiesen ensayar aplicaciones creativas de esta recién descubierta facultad del ARN para plegarse sobre sí mismo y adoptar formas funcionales complejas. En parte, se trataba de comprobar la versatilidad del ARN y, con ello, la verosimilitud de la hipótesis del "mundo del ARN". Importaba, además, dar con nuevas aplicaciones biotecnológicas de las ribozimas. La implicación de nuestro grupo en esas empresas fue lo que nos llevó a mirar más allá de las proteínas, en busca de los misteriosos reguladores de la síntesis de coenzimas bacterianas.

INTERRUPTORES CON PODER DE AUTODETERMINACION

Una forma de regulación celular descubierta en fecha reciente se basa en la capacidad de ciertos genes de autorregularse a través de sus copias en ARN. Los ribointerruptores constituyen segmentos integrados en el extremo de la secuencia puntera de un transcrito de ARN mensajero que cuantifican la demanda celular para la proteína cifrada por el resto de su mensaje; luego remodelan su propia estructura para determinar la síntesis o no de esa proteína. Los ribointerruptores constan, por tanto, de dos dominios: un aptámero, que detecta un metabolito específico (*abajo*), y una plataforma de expresión, que decide el destino del ARNm mediante la adopción de una de las numerosas configuraciones estructurales posibles (*derecha*).



DETECCION DEL METABOLITO
Un aptámero para la coenzima tiamina pirofosfato (TPP) adopta una forma definida (*izquierda*) a medida que se va alejando de la polimerasa. En presencia de TPP, el aptámero se une a ella, engarzando firmemente la molécula (*derecha*).

Sensores naturales

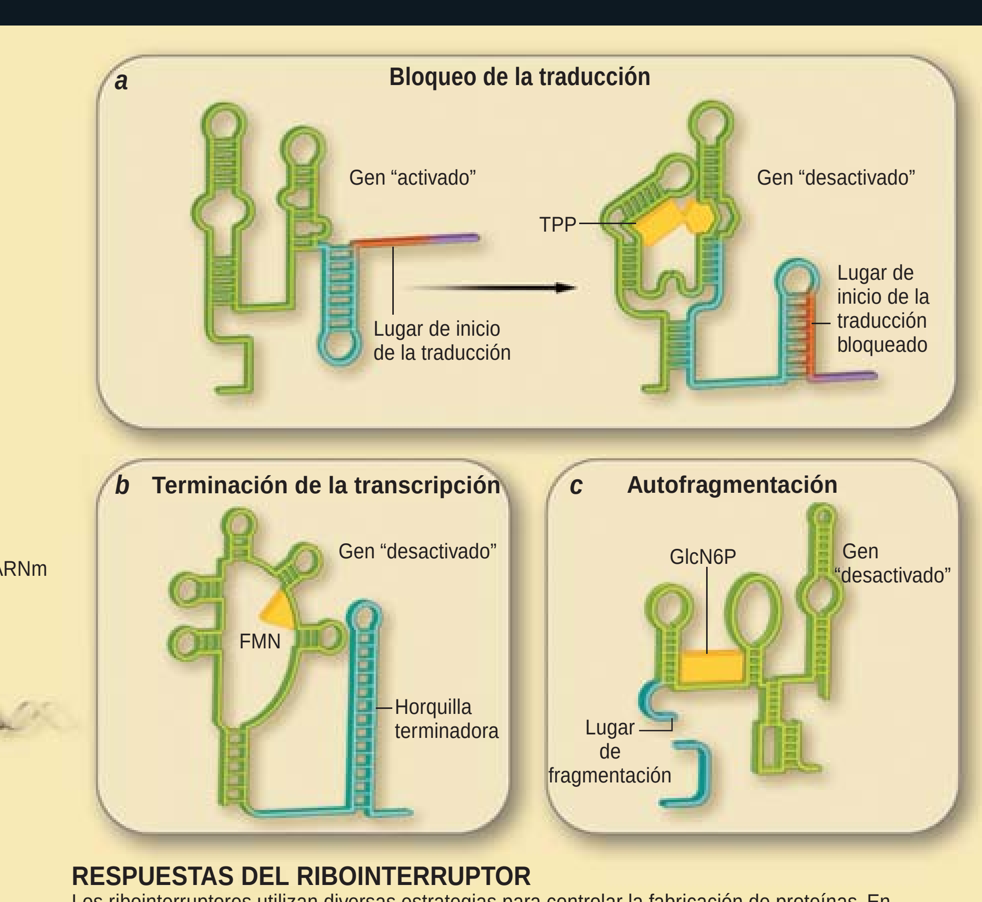
Los laboratorios de Larry Gold, en la Universidad de Colorado en Boulder, Gerald Joyce, del Instituto Scripps de Investigación, y Jack W. Szostak, del Hospital General de Massachusetts, desarrollaron un método para llevar a cabo experimentos *in vitro* sobre la evolución: vale decir, someter a billones de moléculas sintéticas de ARN a un test darwinista que superarían sólo las moléculas más "aptas". Mediante esa técnica de laboratorio, el grupo de Szostak no tardó en descubrir una gama de estructuras cortas de ARN que se enlazaban apretadamente con la adenosina trifosfato (ATP), así como con colorantes orgánicos, aminoácidos y antibióticos.

Szostak bautizó a todas estas moléculas de ARN sintéticas con el nombre de "aptámeros" (de *aptus*, "apto" en latín). Pese a no ser de origen natural, muchos aptámeros poseían una cualidad que, en un contexto biológico, reviste un interés mayor que la unión fuerte a su molécula diana: los aptámeros de marras rechazaban moléculas con estructuras estrechamente relacionadas.

Valía la pena sacarle partido a tamaña selectividad. Con ese fin diseñamos un sensor hecho de ARN. Nos proponíamos crear un aptámero que reconociera una molécula diana mediante su enlace con la misma; luego lo uniríamos a un segundo fragmento de ARN, que emitiría una señal visible, mediante la cual se realizaría el seguimiento del suceso. Para esta última función, seleccionamos la ribozima "cabeza de martillo". Denominada así por el aspecto característico de su estructura, se trata de una de las ribozimas naturales con capacidad de autofragmentación más sencillas y eficaces que se conocen.

Colocaríamos un marcador fluorescente en uno de los extremos de la hebra de la "cabeza de martillo" y un grupo atenuador (llamado así porque debilita la emisión de fluorescencia) muy cercano a él, en el interior de la estructura plegada del ARN. Una vez que el extremo del aptámero de nuestro dispositivo encontrara y se uniera a la molécula diana, la autofragmentación llevada a cabo por la "cabeza de martillo" separaría el grupo atenuador del marcador fluorescente; así, la molécula

TAMI TOLPA



RESPUESTAS DEL RIBOINTERRUPTOR
Los ribointerruptores utilizan diversas estrategias para controlar la fabricación de proteínas. En ausencia de TPP, por ejemplo, la plataforma de expresión deja un lugar de inicio de la traducción accesible a los ribosomas; de ese modo, la expresión de las instrucciones génicas permanece en estado “activado” (*a*, *izquierda*). Cuando el TPP se encuentra unido al aptámero, la plataforma de expresión forma una horquilla que bloquea la traducción: desactiva el gen (*a*, *derecha*). Un ribointerruptor que detecta la coenzima flavina mononucleótido (FMN) forma una horquilla terminadora que suspende la transcripción de su mensaje por parte de la polimerasa (*b*). Una ribozima atípica activada por medio de la glucosamina-6-fosfato (GlcN6P) se autodestruye mediante autofragmentación (*c*).

se iluminaría del mismo modo que si se hubiese quitado la pantalla de un velador.

El ARN demostró ser un sensor exquisito. Desarrollamos luego ribozimas, acopladas a aptámeros, que detectaban y transmitían información sobre la presencia de una amplia gama de moléculas. Nuestra colección de sensores, distribuidos sobre un chip minúsculo, se utilizaba para detectar, de forma simultánea y precisa, multitud de moléculas distintas, incluso en mezclas complejas.

La facilidad con que creábamos los ARN detectores de moléculas pequeñas y transformábamos esa unión en un reordenamiento deliberado de sus propias estructuras nos llevó a preguntarnos si la evolución natural no habría creado ARN similares. En efecto, las ribozimas procedentes del mundo del ARN seguían todavía ahora desempeñando tareas cruciales en los organismos. ¿Quedarían en los genomas modernos por descubrir secuencias correspondientes a otros dispositivos importantes de ARN?

Empezamos por un barrido bibliográfico en busca de pistas que indicasen la existencia de aptámeros naturales. Encontramos sólo referencias sugerentes sobre secuencias de ARN no codificantes que revestían interés para la regulación celular. Ese rastreo de biblioteca nos condujo hacia el misterioso mundo de las bacterias y sus vitaminas. Se mencionaba una proteína, la BtuB, que forma parte del dispositivo que importa la coenzima B_{12} en la bacteria *E. coli*. El transcrito de ARNm que codifica la BtuB comienza con una enorme secuencia guía que consta de 240 nucleótidos no codificantes; su extraordinaria longitud indicaba que podría desempeñar una función poco usual. Además, otro grupo de investigación ya había demostrado que, cuando la concentración de B_{12} en la célula era elevada, se inhibía la síntesis de BtuB. Sin embargo, no se había descubierto ningún centinela proteico que detectase el nivel de B_{12}.

Por la lectura de algunos trabajos nos enteramos de que la presencia de B_{12} evitaba que los ribosomas se uniesen al ARNm de BtuB. Asimismo, cierto experimento sugería que en presencia de B_{12} se producía un cambio estructural en la secuencia del ARNm líder. ¿Podría ser que la larga secuencia líder del ARN de BtuB incluyese un aptámero natural que se uniese a B_{12} y que se encargara de regular la expresión de propio gen?

Mediante la técnica del “sondeo en línea”, cartografiamos las regiones del mensaje del ARN correspondiente a BtuB que adquirían mayor estructuración o flexibilidad en presencia de B_{12}. Descubrimos que, cerca del lugar donde comienza la región codificante del ARNm de BtuB, aparecía un nuevo giro en la estructura. Ese cambio estructural explicaría la inhibición de la unión del ribosoma. Parecía que el propio ARN detectaba la presencia de B_{12} y regulaba su transporte a la manera en que TRAP regula el mensaje del transportador de triptófano en *B. subtilis*: evitando que el ribosoma lo traduzca. Ante esa observación, denominamos “ribointerruptor” a la molécula de ARN que activa o desactiva la expresión de los genes.

Mientras seguíamos estudiando la secuencia guía de BtuB, nos llamó la atención otro misterioso caso de regulación. Se había demostrado, en trabajos precedentes, que en diversos grupos de bacterias todos los ARNm codificadores de enzimas para la síntesis y el transporte de la coenzima B_1 contenían un fragmento común en la secuencia de ARN. Las mutaciones en esta secuencia interrumpían la represión normal de tales genes en las células que habían acumulado una cantidad suficiente de B_1.

En *E. coli*, el ARNm de un operón para dos enzimas de síntesis posee un extremo guía que contiene la secuencia común cerca del lugar donde comienza la traducción de la primera proteína. Observamos que B_1 inducía un cambio estructural en este ARNm; eso significaba que el lugar de unión al ribosoma quedaba alojado en una región firmemente plegada sobre sí misma. Demostramos luego que un dominio de menor tamaño (91 nucleótidos), perteneciente a la secuencia líder, se unía a B_1. Lo mismo que nuestros sensores artificiales, este ribointerruptor natural constaba de un dominio aptámero independiente, enlazado a una secuencia responsable de la "respuesta funcional" que le permitía regular la realización o no de la síntesis de B_1.

Habíamos, pues, encontrado al menos dos ARN mensajeros que registraban las condiciones celulares y tomaban sus propias decisiones para determinar (sin la ayuda de supervisores proteicos) si se requería o no la activación de la maquinaria proteica codificadora. Estas fotocopias en papel ya no constituían mensajes pasivos; se plegaban como una papiroflexia endemoniada y determinaban su propio destino.

Ambos ARN resultaron ser algo más que una rareza. La bibliografía rastreada contenía —en estado latente— interruptores de ARN naturales que reaccionaban ante una gama de otros metabolitos celulares fundamentales. Nuestro laboratorio y otros grupos de investigación no tardaron en identificarlos.

Una secuencia que aparece en bacterias relacionadas con *B. subtilis* resultó ser un ribointerruptor que reconoce a la coenzima S-adenosil metionina (SAM). Un elemento de ARN que aparece en los mensajes que dirigen la síntesis y el transporte de la coenzima flavina mononucleótido (B_2) correspondía a otro ribointerruptor. Una región del ARNm de *E. coli* que supuestamente codificaba una proteína que detectaba la lisina en *E. coli* era, de hecho, un fragmento de un complejo aptámero para la lisina que regulaba la síntesis de este aminoácido en una amplia gama de bacterias. Los ribointerruptores constituían, pues, una forma generalizada de control génico.

Ingeniería inversa de los ribointerruptores

Hasta la fecha, se han descubierto una docena de tipos de ribointerruptores; se definen por la estructura de sus aptámeros. Aunque varían en ciertas características y mecanismos, se han acotado principios generales. Los ribointerruptores corresponden a transcritos de ARN mensajero que regulan la expresión de sus propios genes: controlan si el mensaje que portan se traduce en una proteína o si se destruye antes que el ribosoma llegue a leerlo.

Cada ribointerruptor determina si la célula necesita la proteína que él codifica mediante su capacidad para detectar un metabolito diana y responde luego con una modificación estructural. Un ribointerruptor consta, por tanto, de dos regiones clave: el dominio aptámero, que detecta el metabolito, y la secuencia reguladora, que opera como una "plataforma de expresión".

El aptámero opera como un refinado receptor específico para una pequeña molécula de metabolito. En todos los miembros de una misma clase, encontramos idéntica la estructura central del aptámero, aunque pertenezcan a organismos alejados desde el punto de vista evolutivo. La plataforma de expresión, que incluye parte del dominio aptámero, contiene las secuencias que reorganizan su propia estructura para alterar la expresión génica. Por ejemplo, los ribointerruptores que descubrimos primero, B_{12} y B_1, cuentan con plataformas de expresión que impiden el inicio de la traducción mediante su autoconfiguración para esconder las secuencias que el ribosoma necesita para reconocer una orden de trabajo. Otros ejemplos de ribointerruptores que alojan este mismo tipo de aptámeros poseen plataformas de expresión que provocan el aborto prematuro de la transcripción del ARNm mediante la formación de una horquilla terminadora.

A medida que fuimos desentrañando las funciones de los ribointerruptores, comenzamos a apreciar el cuidado con que la evolución ha

Dianas terapéuticas potenciales

Numerosas bacterias, incluidos los patógenos humanos abajo mencionados, se sirven de ribointerruptores para regular la actividad de sus genes. Los agentes que desencadenan la respuesta de estos ribointerruptores podrían servir, por tanto, como antibióticos de nueva generación, sobre todo si los fármacos desactivan genes esenciales para la supervivencia o la virulencia de un patógeno. En la lista se indica el número de tipos de ribointerruptor encontrados en cada microorganismo y el número de genes regulados mediante ribointerruptores. Los asteriscos señalan que al menos un gen vital está regulado por un ribointerruptor.

Bacteria patógena	Tipos de ribointerruptor	Genes regulados
Acinetobacter baumannii	4	6
Bacillus anthracis	9	82
Brucella melitensis	5	21*
Enterococcus faecalis	7	17
Escherichia coli	4	15*
Francisella tularensis	4	8
Hemophilius influenzae	5	15*
Helicobacter pylori	1	2
Listeria monocytogenes	9	49
Mycobacterium tuberculosis	3	13
Pseudomonas aeruginosa	3	27
Salmonella enterica	3	34*
Staphylococcus aureus	8	30*
Streptococcus pneumoniae	5	19
Vibrio cholerae	5	13
Yersinia pestis	3	11

FUENTE: KENNETH F. BLOUNT Y RONALD R. BREAKER *Universidad de Yale*

calibrado las palancas y resortes que impulsan sus mecanismos. Sea por caso el reconocimiento de metabolitos en las células, que debe tener lugar durante los escasos segundos que transcurren entre el instante en que la polimerasa acaba de fabricar una secuencia guía del ARNm y el momento en que los ribosomas se unen al ARNm para iniciar la traducción.

Por tanto, el factor crítico que determina si un ribointerruptor detecta o no a su diana es la velocidad con que se une al metabolito, no la intensidad de esa unión. En ocasiones se requieren secuencias temporizadoras entre el aptámero y la plataforma de expresión, que hacen que la polimerasa se demore brevemente, para que el aptámero tenga tiempo de captar un metabolito y reajustar su plataforma de expresión.

Cuando comenzamos a escanear los genomas bacterianos en busca de nuevos ejemplos de ribointerruptores, aparecieron nuevas sorpresas. Sólo en el genoma de *B. subtilis* identificamos ocho secuencias con las señas características de los ribointerruptores. Una de ellas correspondía a un ribointerruptor con un aptámero doble, que operaba mediante la activación de la expresión génica, no por su desactivación. Otro resultó ser una ribozima activada por un metabolito. En vez de experimentar una reconfiguración estructural, la plataforma de expresión de esta molécula se autofragmentaba o, dicho en pocas palabras, el mensaje se autodestruía antes de que pudiese traducirse.

Sólo uno de los tipos de ribointerruptor descubiertos hasta la fecha se ha observado en organismos pluricelulares; el resto se halla exclusivamente en bacterias. La regulación génica de los organismos superiores entraña mayor complejidad que la de las bacterias; también la senda que va desde los planos del ADN hasta las proteínas es más tortuosa. En vez de escuetas fotocopias de ARNm, las versiones preliminares de los transcritos génicos suelen presentar enormes fragmentos de texto no codificante, o intrones, que deben podarse del mensaje, antes de que éste se traduzca en proteína. Entre los residuos acumulados en esta especie de "sala de montaje" descubrimos un ribointerruptor.

En numerosos hongos y plantas, el arroz entre las segundas, el aptámero para la coenzima B_1 aparece en las secuencias de los intrones pertenecientes a los operones de la síntesis de la tiamina. Cuando se encuentran unidos a B_1, estos ribointerruptores parecen reorganizar la estructura del ARN alrededor de las fronteras intrón-exón; de ese modo impiden que la maduración del ARN siga su curso. Aunque los detalles no están claros, podría provocar que el mensaje acabe en la papelera o evitar que se traslade a la región celular donde se traduciría.

De hecho, sabemos que un conocido fármaco antifúngico se une al ribointerruptor de B_1. Parece que el fármaco engaña al hongo, haciéndole creer que hay suficiente B_1 e impide con esa argucia que se sintetice más. Dado que el hongo carece de nutriente tan crucial, su crecimiento procede con lentitud y acaba por morir por culpa de esa carencia. Tal y como ilustra este ejemplo, los ribointerruptores constituyen unos reguladores decisivos para el suministro de nutrientes vitales en diversos microorganismos; ello les convierte en atractivas dianas para nuevos antibióticos.

En más de una docena de patógenos humanos la regulación de varios metabolitos importantes depende de ribointerruptores. Se está trabajando en la creación de moléculas que engañen a los aptámeros de los ribointerruptores bacterianos haciéndoles creer que se trata de un metabolito natural y, con ello, desencadenar una respuesta en la regulación génica que resulte perjudicial para la célula.

Se investiga la posibilidad de emplear ribointerruptores artificiales para controlar los genes en el interior celular. En el ámbito de la terapia génica, se trataría de crear un interruptor con dos posiciones (activado y desactivado), que pasara de un estado a otro por medio de una molécula inocua que funcionara como un medicamento e incorporarlo en un gen terapéutico. El constructo penetraría en las células del paciente y se regularía haciendo que la persona tomase una píldora portadora de la molécula que activara el ribointerruptor creado. Igual que las aplicaciones con fines antibióticos, este uso de los ribointerruptores se halla en una fase muy precoz de la investigación.

La existencia misma de los ribointerruptores ha renovado el sentimiento general de sorpresa y excitación que inspiraron las ribozimas así como los esfuerzos realizados para aplicar esas moléculas arcaicas a necesidades actuales. Aunque da la impresión de que sólo perviven trazas y fragmentos del mundo de ARN, los dispositivos de ARN que nos ocupan, dotados de mecanismos complejos y funciones de regulación, se han aferrado tenazmente a los organismos modernos. No nos queda más remedio que preguntarnos si los ribointerruptores constituyen el último vestigio del mundo del ARN o si hay otras moléculas primordiales que siguen operando en las factorías metabólicas o en las oficinas administrativas de nuestras células y que están esperando ser descubiertas.

Los autores

Jeffrey E. Barrick y **Ronald R. Breaker** estudiaron los ribointerruptores en el laboratorio de Breaker en la Universidad de Yale. Barrick realiza ahora un posdoctorado, en la Universidad estatal de Michigan, sobre la evolución de las bacterias y los programas informáticos autorreplicantes. Breaker sigue explorando la naturaleza y las aplicaciones de los ácidos nucleicos, mediante el diseño de elementos de ARN para el control génico y mediante el desarrollo de antibióticos dirigidos contra ribointerruptores naturales.

Bibliografía complementaria

ORIGEN DE LA VIDA SOBRE LA TIERRA. Leslie E. Orgel en *Investigación y Ciencia*, n.º 219, págs. 46.53; diciembre, 1994.

THIAMINE DERIVATIVES BIND MESSENGER RNAS DIRECTLY TO REGULATE BACTERIAL GENE EXPRESSION. Wade Winkler, Ali Nahvi y Ronald R. Breaker en *Nature*, vol. 419, págs. 952-956; 31 de octubre, 2002.

METABOLITE-BINDING RNA DOMAINS ARE PRESENT IN THE GENES OF EUKARYOTES. Narasimhan Sudarsan, Jeffrey E. Barrick y Ronald R. Breaker en *RNA*, vol. 9, n.º 6, págs. 644-647; junio, 2003.

RIBOSWITCHES AS ANTIBACTERIAL DRUG TARGETS. Kenneth F. Blount y Ronald R. Breaker en *Nature Biotechnology*, en prensa.

La quinasa HT1

CO_2 y estomas

Las plantas intercambian gases con la atmósfera a través de los estomas. Estas estructuras foliares constan de dos células que delimitan un poro, cuya apertura permite la entrada de CO_2 al interior de la hoja. El cierre del poro impide que la planta libere a la atmósfera vapor agua en exceso. Múltiples factores ambientales y diversas señales endógenas regulan la apertura y cierre del poro y, con ello, el intercambio gaseoso entre la planta y la atmósfera.

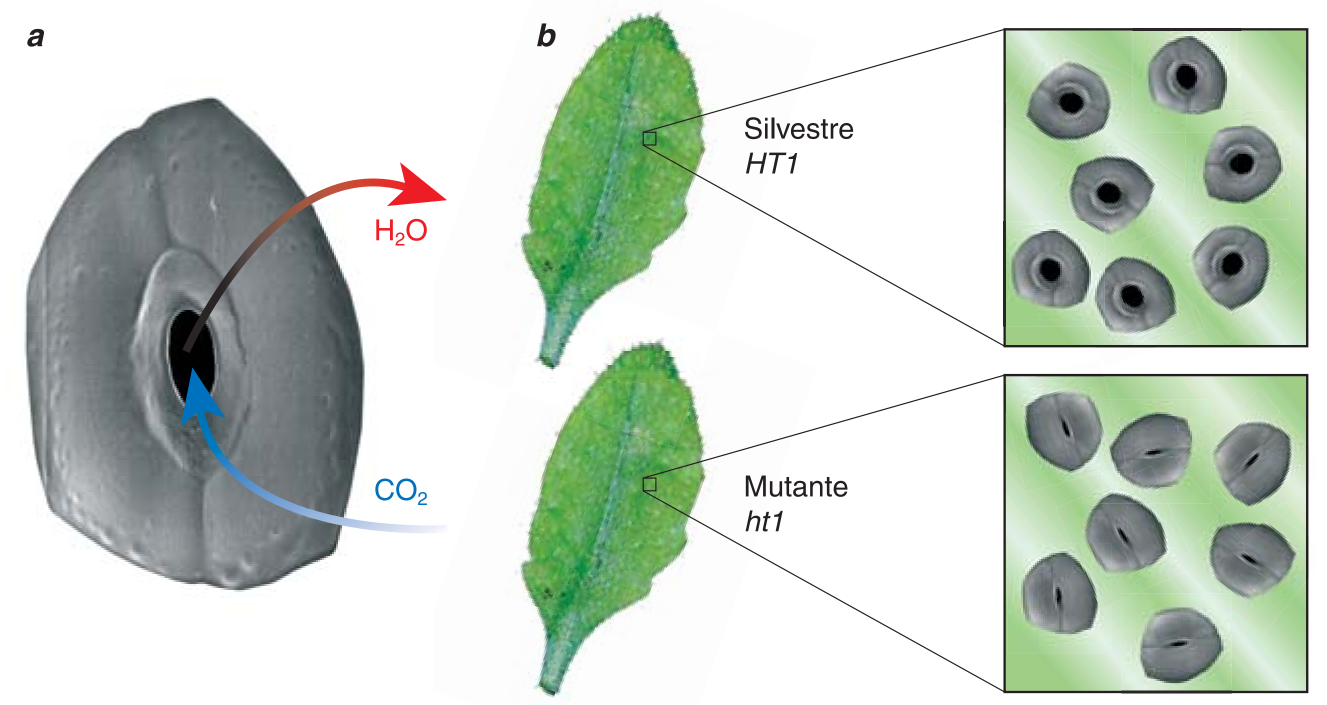
Uno de los factores aludidos es la concentración atmosférica de CO_2. Se sabe que el tamaño del poro disminuye al aumentar la concentración de CO_2 y aumenta cuando ese parámetro cae. El tamaño de los poros no puede observarse a simple vista. Sin embargo, debido a que la pérdida de vapor de agua a través del estoma enfría la hoja, la temperatura foliar sirve de indicador de la apertura del poro. Una amplia apertura desencadena un enfriamiento foliar, y viceversa.

El grupo encabezado por Koh Iba, de la Universidad de Kyushu, ha identificado dos mutantes de *Arabidopsis thaliana* (*ht1-1* y *ht1-2*, de "*high leaf temperature-1*", o "alta temperatura foliar 1"), cuyas hojas están más calientes que las de plantas silvestres cuanto se las transfiere a niveles de CO_2 inferiores a los actuales. Pero, ¿qué causa este aberrante calentamiento foliar?

Ambos mutantes, en los que la función del gen *HT1* está alterada (*ht1-1*) o interrumpida (*ht1-2*), no abren los poros tras su transferencia a una atmósfera pobre en CO_2. Las hojas de *ht1* están más calientes debido a una pobre apertura del estoma, que impide una pérdida eficiente de vapor de agua. Se llega a la conclusión de que la apertura del poro cuando a las plantas silvestres se les aplica un nivel de CO_2 inferior al actual se debe a la activación del gen *HT1*. Un reducido tamaño del poro en estas condiciones acarrearía consecuencias drásticas, pues limitaría la entrada del escaso CO_2 al interior de la hoja, con la repercusión consiguiente en la fotosíntesis.

El grupo de Koh Iba ha avanzado un paso más al descifrar que el gen *HT1* codifica una proteína quinasa, HT1. La apertura del poro inducida por niveles de CO_2 inferiores a los actuales depende de la actividad quinasa de HT1.

Koh Iba y sus colaboradores examinaron la apertura del poro en respuesta a cierta toxina activadora de la



Los estomas están constituidos por dos células que delimitan un poro, cuyo tamaño se puede regular. A través del poro, entra CO_2 al interior de la hoja, donde el proceso fotosintético lo asimila, y sale agua al exterior (*a*). Las plantas silvestres abren ampliamente el poro cuando se las transfiere a una atmósfera con bajos niveles de CO_2. De esta forma, pueden captar el escaso CO_2 y realizar la fotosíntesis. Sin embargo, los mutantes *ht1* no abren sus poros cuando se transfieren a una atmósfera pobre en CO_2. Esto indica que la apertura del poro cuando se traslada la planta a una atmósfera pobre en CO_2 se debe a la quinasa codificada por el gen *HT1* (*b*).

H^+-ATPasa anclada en la membrana de las células del estoma. La activación de esta enzima desencadena la apertura del poro mediante la inducción de un potencial eléctrico en la membrana; se necesita ese potencial para conducir el ion potasio (K^+) hacia el interior de las células del estoma. La entrada de K^+ en el interior de las células del estoma abre el poro. Cuando la toxina activó la H^+-ATPasa, los estomas de los mutantes *ht* y de las plantas silvestres se abrieron, tras su transferencia a una atmósfera pobre en CO_2. Parece, pues, que el gen *HT1* controla el movimiento del estoma con una actuación previa a la activación de la H^+-ATPasa. El gen *HT1* podría también activar, directamente, esta enzima.

Pero, ¿controla HT1 eventos, activados por distintos estímulos, que desencadenen movimientos estomáticos? Para responder a la cuestión, el grupo de Iba investigó el efecto del ácido abscísico (que evita una excesiva pérdida de agua cerrando los estomas) y de la luz azul (que activa la fotosíntesis induciendo la apertura del poro) en la función de HT1. Los poros de los mutantes *ht1*, menos abiertos que los de plantas silvestres bajo los niveles actuales de CO_2, reaccionan a la presencia de ácido abscísico cerrándose de forma hermética. De lo que se desprende que HT1 no interviene en la ruta de señalamiento del ácido abscísico.

Los mutantes *ht1* y las plantas silvestres responden a la luz azul. Ahora bien, mientras la apertura del poro aumenta mucho en las plantas control, sólo lo hace parcialmente en las mutantes. Con otras palabras, el gen *HT1* regula el movimiento del estoma que se produce en respuesta a la luz azul.

Se sabe que la luz azul regula la apertura del poro mediante la activación de la H^+-ATPasa de la membrana de las células del estoma. Parece, pues, que HT1 participa en las rutas de señalización por luz azul y CO_2, antes de la activación de la H^+-ATPasa, con la inducción de la apertura del estoma.

Dado que las mayores diferencias en la apertura del poro entre los mutantes *ht1* y las plantas control se dieron como reacción a cambios en la concentración de CO_2, es probable que los niveles de este gas sean la principal señal desencadenante de la puesta en marcha de la función de HT1.

La concentración atmosférica de CO_2 ha aumentado desde la revolución industrial. Se prevé que la concentración actual se doblará en el curso de nuestro siglo. ¿Tendrá HT1 alguna función en el futuro? No parece que regule la apertura del estoma bajo concentraciones de CO_2 superiores a las actuales, como sugiere el funcionamiento normal del estoma del mutante *ht1* cuando las concentraciones de CO_2 son de esa magnitud.

No obstante, el gen de *Arabidopsis HIGH CARBON DIOXIDE*, que codifica una enzima implicada en la síntesis de ácidos grasos de cadena larga, evita el incremento del número de estomas cuando aumenta el CO_2 atmosférico por encima del nivel actual. Tal incremento en el número de estomas podría tener graves consecuencias para la supervivencia vegetal, debido a una pérdida excesiva de agua. Parece, pues, que las plantas poseen capacidad de adaptarse a condiciones ambientales difíciles ajustando la función y el desarrollo de sus estomas.

Todo esto nos indica que las plantas están "equipadas" con genes que les permiten adaptarse a un entorno cambiante. HT1 asegura que los estomas se abrirán al bajar la concentración de CO_2 o aplicar luz azul, para captar tanto CO_2 como sea posible mientras pierden la menor cantidad de agua. Desvelar los componentes de la ruta mediada por HT1 y la interacción de dicha ruta con la luz u otros factores son algunos de los retos que depara el futuro.

LAURA SERNA
Facultad de Ciencias
del Medio Ambiente
Universidad de Castilla-La Mancha,
Toledo

Suelos de Tabasco

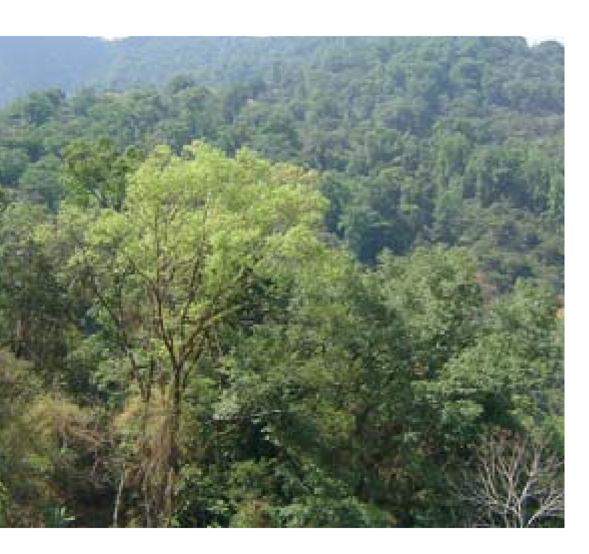
Su fertilidad bajo diferentes usos de la tierra

Tabasco, provincia del sudeste de México, cuenta con una gran riqueza de flora y fauna. Posee, además, uno de los sistemas hidrológicos más importantes del país. En los últimos 40 años, la deforestación ha modificado el paisaje y la calidad del suelo. En la definición de calidad del suelo dada por John W. Doran, de la Universidad de Nebraska, y Timothy B. Parkin, del departamento de agricultura de EE.UU., intervienen varios factores: uso del terreno, ecosistema que soporte, productividad biológica, calidad ambiental y salud de plantas, animales y personas. A esos factores que caracterizan la calidad de un suelo se han añadido la sostenibilidad y la fertilidad. A propósito de esta última nota distintiva se abunda en los componentes químicos, físicos y biológicos que sirvan de indicadores de la dicha fertilidad.

En el estado de Tabasco se han apreciado múltiples prácticas que afectan a la fertilidad del suelo. A lo largo de los últimos años la superficie de pastizales ha crecido hasta sustituir a amplias zonas de selva. El cultivo del pasto *Cynodon plectostachyus* y el sistema de intercalar pastos y bosques en la región meridional de la provincia han permitido incrementar la materia orgánica, el nitrógeno total y la densidad de lombrices en suelos acrisoles (ácidos). Ambos métodos conservan el suelo de la zona. Cabe, pues, recomendarlos. Por el contrario, el cultivo *Brachiaria decumbens* y otros pastos ha degradado las propiedades biológicas del suelo, en particular la densidad de lombrices.

Uno de los autores (Geissen) y Gilberto Morales Guzmán observaron que los efectos de los diferentes sistemas de uso del suelo afectan más a las propiedades biológicas que a las químicas. Con cualquier régimen de uso, la macrofauna y la mesofauna del suelo aceleran más la tasa de descomposición de la hojarasca que la microflora y la microfauna.

En Macuspana, un municipio de la zona sureña, encontramos lomas y elevaciones cultivadas también con pasto *Cynodon plectostachyus*, aunque en este caso se trata de suelos



1. De 1940 al 2002, la selva se redujo de 49,1 % de la superficie del estado de Tabasco al 13,6 %.



2. Al sur del estado de Tabasco se observan suelos ocupados por pastizales con rasgos de erosión.

arcillosos como los vertisoles (de arcillas que se expanden, contraen y agrietan). Se observan en ellos rasgos de erosión: la deforestación ha ocasionado alteraciones en los balances hídricos y los niveles freáticos, lo que se refleja en la formación de cárcavas, pozos, deslizamientos de masas y agrietamientos.

En el oeste del estado se encuentra una llanura de inundación, cerca de la costa del golfo de México, que abarca parte de los municipios de Cárdenas y Huimanguillo. Hace más de 40 años había allí selva baja perennifolia; hoy se cultivan caña de azúcar, pastos, maíz y hortalizas. Predominan los suelos arcillosos, como los vertisoles. En estos suelos no se observan restricciones químicas para el crecimiento de plantas —las proporciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, como, el *p*H de 5,56, son adecuados—, pero las propiedades físicas sí presentan limitaciones: compactación, pobre estructura y escaso drenaje.

Otro de los autores (Sánchez Hernández), del Instituto de Recursos Genéticos de México, y sus colaboradores han observado que los aportes de compost (humus artificial) y residuos orgánicos no afectan a las propiedades químicas en el corto plazo; sin embargo, sí se ha visto que ayudan a recuperar las buenas características físicas: posibilitan una menor compactación y una mejor estructuración de los suelos, aumentan su productividad y reducen el agrietamiento en épocas de sequía.

Según Angélica Bautista Cruz, del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, en Sinaloa, la sostenibilidad es un concepto que lleva implícitos tres componentes: la dimensión ecológica, la económica y la social. La primera se refiere a las características que deben presentar los ecosistemas para mantenerse a lo largo del tiempo, la segunda a la rentabilidad, y la tercera al nivel de aceptación y satisfacción de la sociedad.

Al retomar esta definición, concluimos que es importante que los cambios de uso de suelo satisfagan las necesidades de poblaciones que cada vez demandan más, sin que se cause la degradación irreversible de los recursos naturales. Para ello, es necesario conocer las propiedades nativas del suelo, su vocación productiva y las características del medio; con esa información se puede determinar la capacidad que tendrá de soportar cambios de uso y la durabilidad de los sistemas de producción que se le apliquen.

Es importante que el laboreo de los suelos comprenda un reciclaje de nutrimentos que garantice la conservación de sus propiedades químicas, físicas o biológicas.

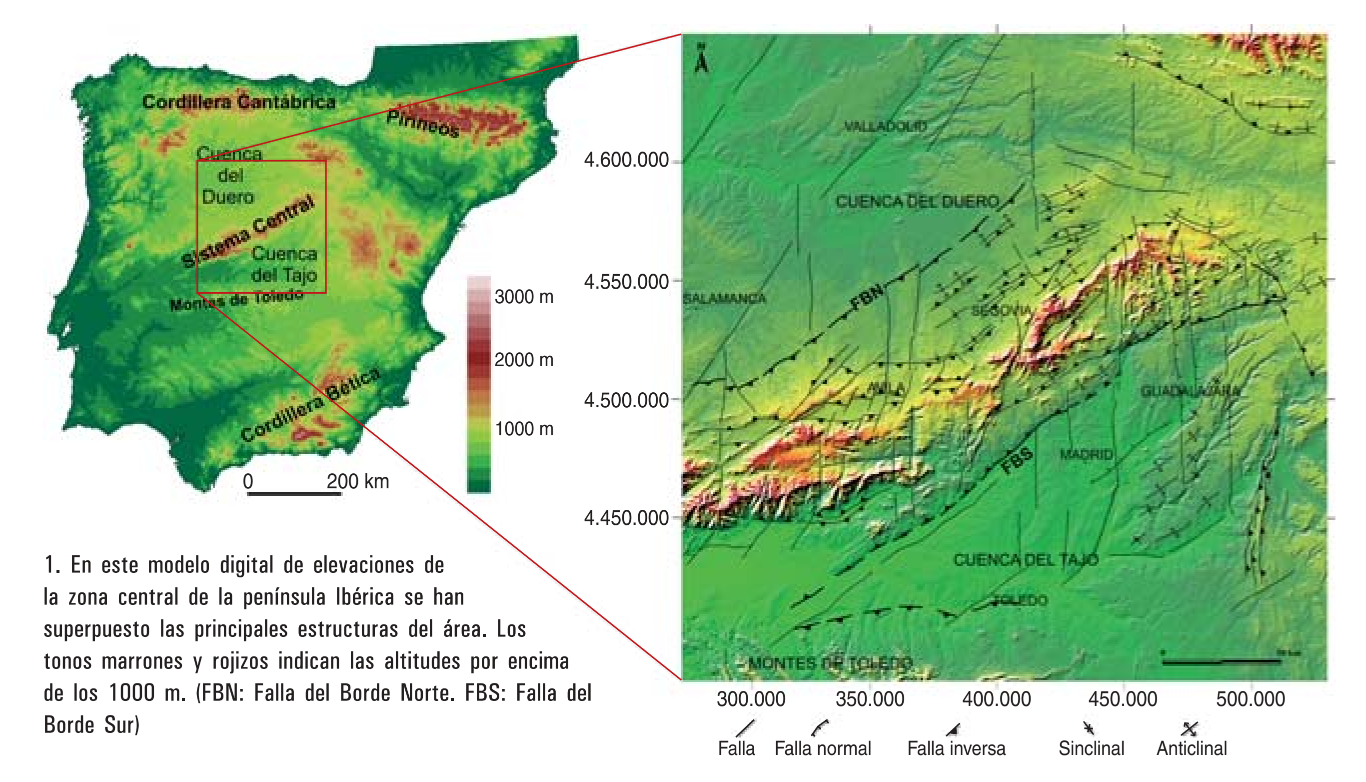
Violette Geissen
Rufo Sánchez Hernández
Colegio de la Frontera Sur,
Villahermosa, Tabasco,
México

Tectónica y relieve
en el centro de la península Ibérica

A finales del Mesozoico, hace unos 65 millones de años, la protopenínsula Ibérica constituía un área emergida entre Eurasia y Africa. Era una región de relieve suave, formada en la zona occidental por rocas proterozoicas y paleozoicas y, en la oriental, por sedimentos mesozoicos.

En el Terciario, la convergencia de las placas euroasiática y africana cambió drásticamente la estructura geológica de la placa Ibérica y, por ende, su relieve. La colisión de la placa Ibérica con Eurasia creó los Pirineos en su borde norte. En su borde sur, la colisión con Africa formó la cordillera Bética; los esfuerzos generados en la colisión se transmitieron hacia el interior, dando lugar a una cadena montañosa, el Sistema Central, flanqueada por dos cuencas sedimentarias, la cuenca del Duero al norte y la del Tajo al sur. Ambas están rellenas de sedimentos terciarios que llegan a alcanzar espesores de más de 3000 m en surcos situados en las inmediaciones de las cadenas montañosas adyacentes, la cordillera Cantábrica, prolongación hacia el oeste de los Pirineos, el Sistema Central y los Montes de Toledo.

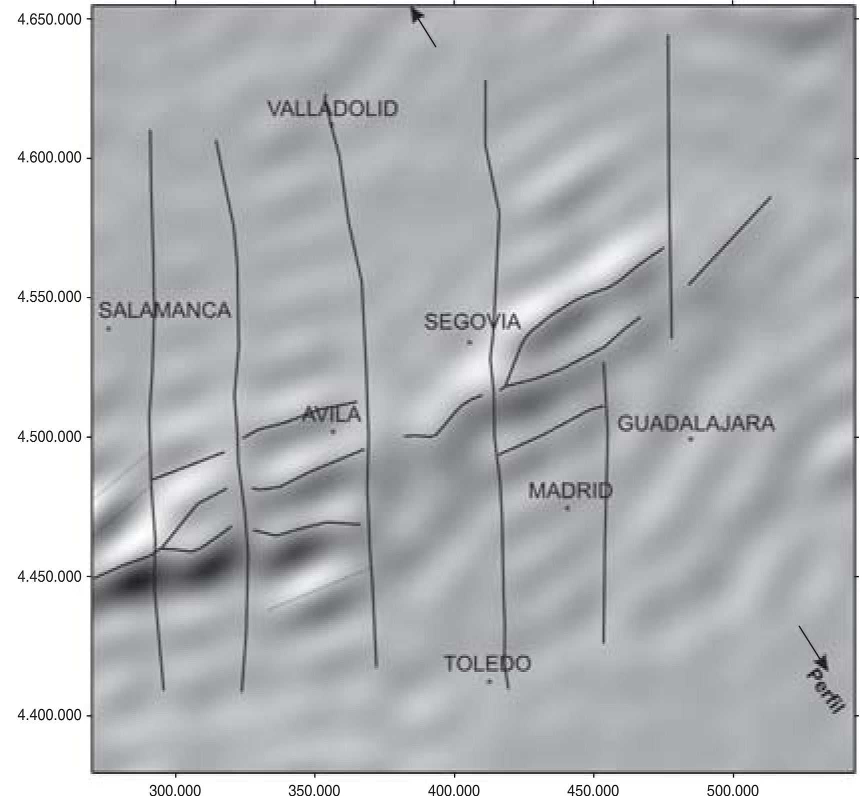
Frente a los relieves suaves de las cuencas, alterados sólo por el encajamiento de los valles en algunas partes, se levanta la alineación montañosa del Sistema Central. Constituye un bloque cortical elevado al que limitan dos fallas inversas de orientación NE-SO. Ese bloque aparece formado por extensos afloramientos de rocas metamórficas e ígneas sobre las que se disponen afloramientos de sedimentos mesozoicos que orlan la cadena en su parte oriental. Considerando que, según los datos sísmicos, estas rocas se encuentran a profun-

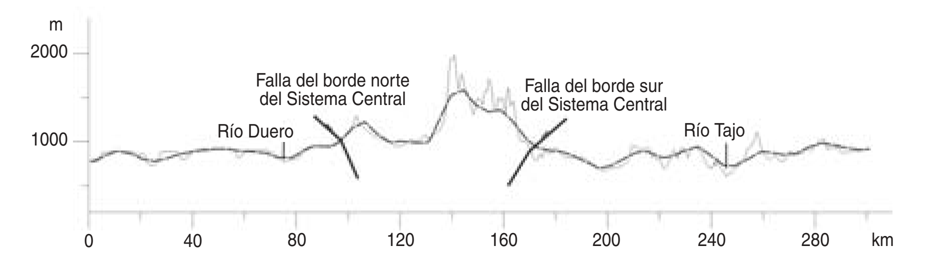


1. En este modelo digital de elevaciones de la zona central de la península Ibérica se han superpuesto las principales estructuras del área. Los tonos marrones y rojizos indican las altitudes por encima de los 1000 m. (FBN: Falla del Borde Norte. FBS: Falla del Borde Sur)

didades de más de 2000 m bajo el nivel del mar en las cuencas y que alcanzan más de 2000 m de altitud en el Sistema Central, el levantamiento del bloque cortical durante el Terciario excedió los 4000 m.

Un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representa la distribución de altitudes del terreno. Viene a ser en la cartografía digital lo que el mapa topográfico en la ordinaria (*véase la figura 1*). El del centro de la Península, sobre el cual se han cartografiado las principales estructuras tectónicas, muestra la clara relación existente entre las formas del relieve y las estructuras tectónicas. El borde meridional de la cadena montañosa está marcado por un escarpe





2. Superficie armónica de 20 km longitud de onda, calculada a partir del análisis los datos topográficos. Los trenes de onda tienen orientaciones E-O a NE-SO y representan pliegues que deforman la parte superior de la corteza. Las líneas negras NE-SO indican las crestas de las ondulaciones de mayor amplitud y las de orientación N-S fallas que limitan dominios con distinta orientación. En la parte inferior se ha representado el perfil topográfico real (*línea continua*) y el perfil de la superficie armónica (*línea a trazos*), para su comparación.

relacionado con la falla del borde sur; indica su reciente actividad tectónica. En el límite norte, una superficie de suave pendiente enlaza la cuenca del Duero con las estribaciones montañosas; cuesta identificar en ella la falla del borde norte, cuya posición se ha determinado por métodos geofísicos.

La cadena montañosa consta de sierras y depresiones de orientación E-O a NE-SO, que corresponden a bloques levantados siguiendo fallas inversas —en las que el bloque techo, el que está sobre el plano de la falla, sube— y limitados por corredores donde se crean pequeñas cuencas o instalan cursos fluviales lineales con valles encajados. Esta misma característica se observa también en los valles N-S, controlados por fallas con idéntica orientación. En las cuencas, las estructuras no son tan evidentes, salvo en la zona oriental de la cuenca del Tajo, donde los sedimentos terciarios están afectados por un conjunto de pliegues de dirección NE-SO.

A escala regional, el análisis del registro tectónico del relieve puede realizarse mediante el examen de tendencias de la topografía. Aplicando el análisis de Fourier a los datos topográficos del centro peninsular, se descompone la topografía en superficies armónicas de distinta longitud de onda. Una de ellas, la correspondiente a una longitud de onda de 20 km, refleja con gran aproximación las principales morfoestructuras de la región. La superficie está caracterizada por ondulaciones cuyos surcos y crestas describen las alineaciones de sierras y depresiones, así como los valles principales y las divisorias de agua locales.

El grado de correlación entre la superficie topográfica y la superficie armónica queda ilustrado en el perfil construido. La superficie armónica representa una superficie suavizada, en la que, sin embargo, se reconocen los principales rasgos del relieve. Las ondulaciones tienen unas orientaciones E-O y NE-SO, alcanzan las mayores amplitudes en el Sistema Central y se extienden hacia el interior de las cuencas. Su posición coincide con la situación de bloques elevados y depresiones y con las orientaciones de pliegues cartografiados; vienen a ser pliegues que deforman la parte superior de la corteza del centro peninsular. Lateralmente, los trenes de pliegues se interrumpen y cambian de orientación según estructuras N-S, que coinciden con fallas cartografiadas.

Todas estas estructuras se han formado en un régimen tectónico de colisión entre placas, bajo un campo de esfuerzos cuya dirección de máximo acortamiento horizontal tiene una orientación dominante NO-SE. El campo de esfuerzos estructuró el interior de la placa Ibérica durante el Terciario y sigue actuando en la actualidad: es el responsable de la sismicidad existente.

La actividad tectónica más intensa culminó en el Mioceno Superior con el levantamiento final del Sistema Central. Desde entonces se ha atenuado; en los tiempos más recientes la ha caracterizado una baja intensidad. El relieve se ha ido ajustando a los cambios debidos a la deformación cortical y ha ido convirtiéndose en su registro. La tectónica, creadora de la estructura de la corteza, es, junto con el clima y la litología, uno de los factores fundamentales del relieve. Entre todos configuran los paisajes que se contemplan sobre la superficie terrestre.

ROSA TEJERO LÓPEZ
Depto. de Geodinámica
Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

DAVID GÓMEZ ORTIZ
ESCET-Area de Geología
Universidad Rey Juan Carlos, Madrid

JAVIER RUIZ
Instituto de Astrofísica de Andalucía,
CSIC, Granada

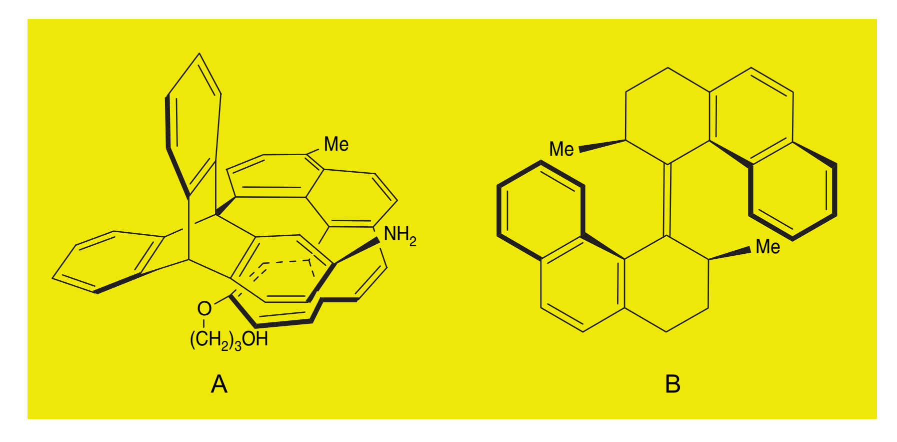
FERNANDO SÁNCHEZ SERRANO
Tragsatec,
Madrid

Motores moleculares

Reversibles

Los motores moleculares forman parte de nuestra propia biología, donde rigen funciones comunes del ser humano. Es el caso de la miosina, responsable, mediante su interacción con la actina, del movimiento muscular; o de la cinesina y la dinaína, que utilizan los microtúbulos del citoesqueleto para transportar material celular. Pero no sólo el cuerpo humano contiene motores así: las bacterias se propulsan con su motor flagelar hacia condiciones de vida mejores.

Ante la importancia de estas moléculas, muchos investigadores se propusieron conocer el funcionamiento de tan impresionantes estructuras. Así, en 1997 P. Boyer y J. Walter recibieron el premio Nobel por su contribución a la elucidación del funcionamiento del motor molecular FoF1-ATPasa. Pero no sólo se han limitado al conocimiento de los mecanismos de acción. A partir de esas estructuras y de su *modus operandi* se han creado motores moleculares sintéticos.



1. Motores moleculares unidireccionales formados por un heliceno y un tripticeno (*A*) y un alqueno helicoidal (*B*).

2. En esta representación esquemática (*izquierda*) del motor molecular reversible que se describe en el artículo, las bolas simbolizan las barreras que impiden la circulación de una estructura cíclica, el “anillo pequeño”, representado por un aro azul, entre dos “estaciones”, simbolizadas por los cilindros verde y naranja. La composición química real de estos elementos es la de los componentes del mismo color en el esquema de la derecha.

Uno de esos sistemas (*véase la figura 1, A*) es el constituido por un tripticeno y un heliceno; conectados con un enlace químico sencillo, funcionan como un eje de rotación. Este motor gira merced a la energía química producida por la formación y ruptura de enlaces químicos entre los grupos amino (NH_2) e hidroxilo (OH) presentes en su estructura.

Otro, de los más prometedores (*figura 1, B*), es un alqueno helicoidal que toma su energía de la luz. Así, mediante reacciones fotoquímicas se producen desplazamientos de componentes moleculares de un modo controlado. Se ha descubierto que este motor puede causar en matrices de cristales líquidos un cambio de color: la longitud de onda de reflexión cambia al variar la helicidad, una medida del giro de la hélice del alqueno. Modificando ligeramente la estructura es posible controlar la velocidad de giro del rotor.

Todos estos motores funcionan en una determinada dirección. Para lograr esta extraordinaria propiedad, los motores biológicos aprovechan en sus mecanismos el movimiento browniano, aleatorio e incesante. En cambio, mediante el control de ese mismo tipo de movimiento, Euan R. Kay, David A. Leigh y el autor desarrollaron recientemente en la Universidad de Edimburgo, un motor molecular reversible (*véase la figura 2*).

Tras muchos intentos de explicar teóricamente el modo de actuación de los motores moleculares, se ha llegado a la conclusión de que utilizan tres componentes: 1) un componente aleatorio, que puede ser el movimiento browniano; 2) un combustible o energía introducida, para no violar el segundo principio de la termodinámica, y 3) la asimetría en la energía o información potencial, según la dirección y sentido en que se quiera mover el sistema.

El empleo de catenanos para estudiar el movimiento a nivel submolecular ha resultado muy importante para el descubrimiento de estos principios. Al igual que los motores moleculares biológicos, los catenanos, moléculas formadas por dos o más componentes anillados, o “macrociclos”, tienen una limitada libertad de desplazamiento relativo (tómese como símil el movimiento restringido de un tren sobre una vía: únicamente puede desplazarse hacia detrás o hacia delante en la dirección de la vía). Podemos, en consecuencia, considerar tales sistemas como motores moleculares sintéticos. Uno de los anillos del catenano, el grande, transporta a lo largo de sí mismo un sustrato, el anillo pequeño.

Para crear nuestro motor reversible nos valimos de un catenano cuyo macrociclo pequeño se conecta al anillo grande en dos posiciones, o “estaciones”, a través de un par de rutas que pueden bloquearse por separado. Abriendo y cerrando cada ruta, se permitirá o impedirá el paso del anillo pequeño y se controlará la dirección en que se mueva. Además, para que esto sea posible hace falta que exista una diferencia en la afinidad química con el anillo pequeño de las dos estaciones presentes en el grande.

En equilibrio, el anillo pequeño se encuentra distribuido entre dos estaciones, de acuerdo con la distribución estadística de Boltzman, que establece la probabilidad de que los componentes de un sistema se encuentren en un estado de energía u otro. En el singular motor que creamos, el camino entre ambas estaciones se diseñó para que fuera asimétrico: de esta manera el anillo prefiere estar únicamente en una de ellas. Pero un cambio externo, una energía consumida, modifica químicamente uno de esos sitios de conexión; con ello, la estación de menor afinidad por el macrociclo se convierte ahora en la más favorable. El elemento aleatorio —las fluctuaciones térmicas— provee la energía requerida para que el anillo pequeño rompa su lazo con la estación y emprenda un camino browniano hasta alcanzar la nueva posición de equilibrio.

Richard Feynman, pionero de la nanotecnología, se percató ya de que había que domesticar el movimiento browniano para darle una direccionalidad al movimiento: había que añadir una información externa, definida en el caso del catenano por el camino en el cual la ruptura del equilibrio que hacía más favorable una estación que la otra se empareja con la apertura o clausura de las barreras que impiden ir de una estación a otra.

En este catenano que actúa como motor molecular reversible se separan los componentes termodinámicos, que establecen los equilibrios entre estaciones, de los cinéticos, relativos al cerrar y abrir las barreras que bloquean las rutas. Así se establecen sin ninguna duda los requisitos de un motor molecular reversible: según el orden de la secuencia de operaciones químicas que materializan los mecanismos del motor, éste girará en sentido horario o en sentido contrario al de las agujas del reloj.

José Vicente Hernández
Escuela de Química
Universidad de Edimburgo

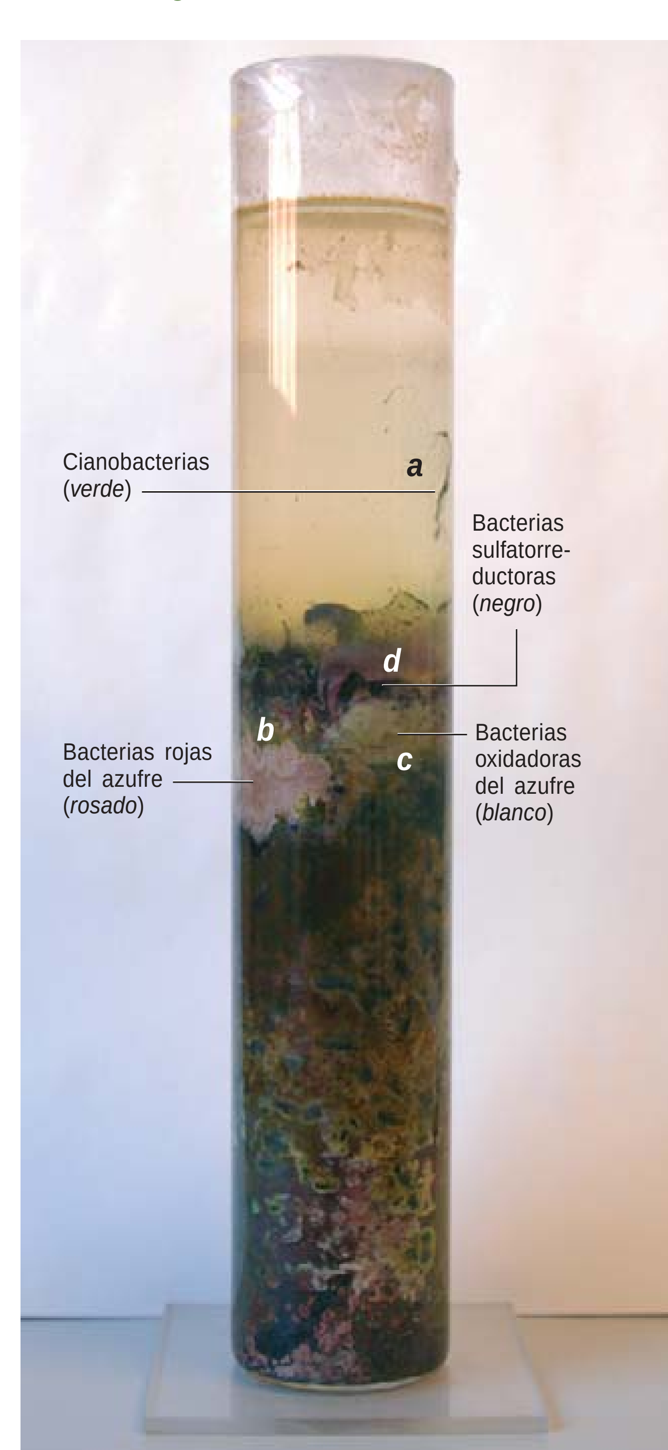
Alícia Duró y Jordi Urmeneta

Manchas cromáticas o diversidad de microorganismos

Mientras estudiaba *Beggiatoa alba*, Sérgej Winogradsky (1856-1952), microbiólogo ruso, ideó un método para promover el desarrollo del microorganismo en el laboratorio, cual si se hallara en la naturaleza. En recipientes cilíndricos de vidrio añadía lodo o sedimento, agua y nutrientes; al cabo de un mes, observaba una proliferación de las bacterias del azufre, objeto de su investigación.

La columna de Winogradsky, así se llama el montaje, remeda las condiciones de la columna de agua de un ecosistema lacustre o marino. La altura de la columna favorece, en la superficie del lodo, el desarrollo de una zona aeróbica; por debajo, una zona microaerofílica y anaeróbica. Si la columna se expone a la luz, transcurridas unas semanas observaremos diversas poblaciones de microorganismos fototróficos, heterotróficos y quimiolitotróficos. Se desarrolla un ecosistema dinámico, en el que las poblaciones varían a lo largo del tiempo.

Por encima del sedimento se distinguen ciertas manchas verdes: organismos fototróficos oxigénicos, como las algas y las cianobacterias. Las manchas rojas o rosadas, que se forman en zonas más profundas, corresponden a las bacterias rojas del azufre (*Chromatium* sp., *Thiocapsa* sp.), que realizan la fotosíntesis anoxigénica. Las manchas verdes, en el sedimento, son de bacterias verdes del azufre (*Chlorobium* sp.) y no del azufre (*Chloroflexus* sp.) que también realizan la fotosíntesis anoxigénica. Las de color blanco informan de la presencia de bacterias oxidadoras del azufre (*Beggiatoa* sp., *Thiotrix* sp.); su metabolismo es quimiolitotrófico. Finalmente, las manchas negras corresponden a las bacterias sulfatorreductoras (*Desulfovibrio* sp., *Desulfotomaculum* sp.), microorganismos incoloros que realizan la sulfatorreducción (o respiración del sulfato). El color negro del sedimento se debe a la precipitación de sulfuro de hierro.



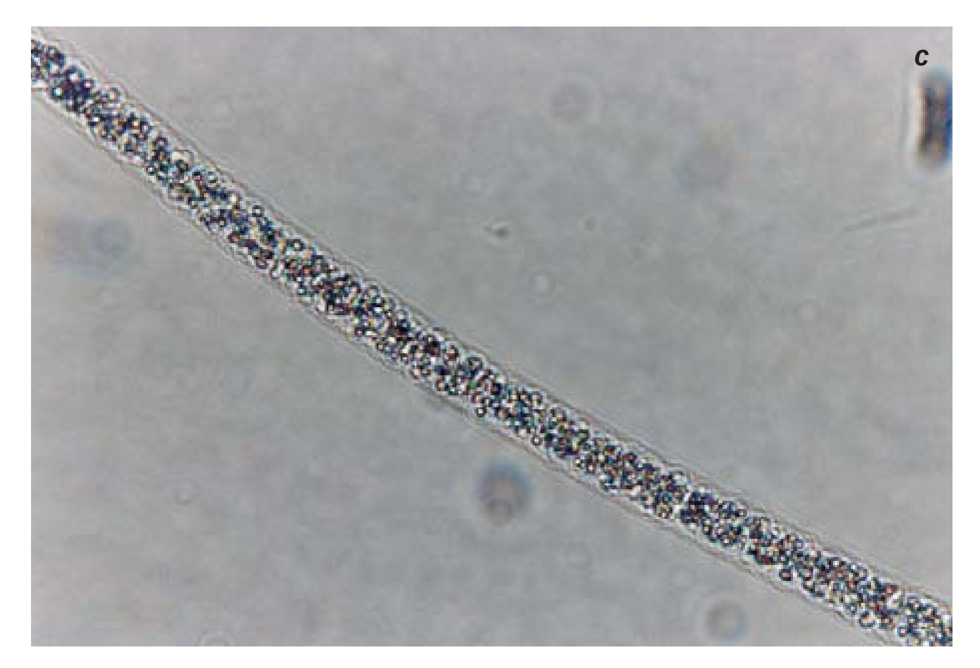
1. Columna de Winogradsky. Las manchas verdes, rosadas, blancas y negras corresponden a poblaciones de microorganismos diferentes.



2. Cianobacterias vistas al microscopio óptico. Estas bacterias aeróbicas, fototróficas y oxigénicas, aprovechan la energía lumínica y fijan el dióxido de carbono. Obtienen los electrones del agua, que al romperse genera el oxígeno que se desprende luego al medio.

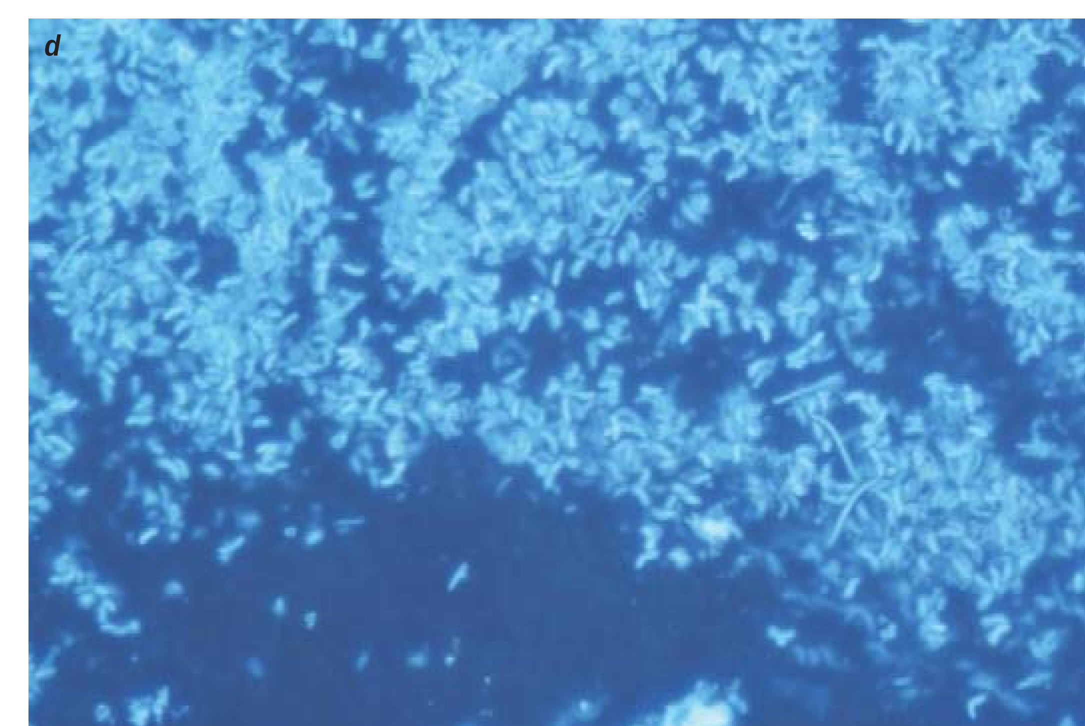
3. *Chromatium* sp. vista al microscopio óptico. Esta bacteria roja del azufre es un microorganismo anaeróbico estricto: no puede vivir en presencia de oxígeno. Son microorganismos fotosintetizadores. Aprovechan la energía lumínica y fijan el dióxido de carbono. Obtienen el poder reductor a través del sulfuro de hidrógeno: lo oxidan a azufre elemental, que se acumula en el interior celular en forma de gránulos.





4. *Beggiatoa* sp. vista al microscopio óptico. El metabolismo de esta bacteria oxidadora del azufre es quimiolitotrófico. Utiliza el sulfuro del hidrógeno como fuente de electrones para la cadena respiratoria; el oxígeno opera como aceptor terminal. El azufre producido se acumula en forma de gránulos en el citoplasma. Algunos de estos organismos quimiolitotróficos fijan dióxido de carbono; otros incorporan materia orgánica como fuente de carbono.

5. *Desulfovibrio* sp. vista al microscopio óptico de epifluorescencia (tinción DAPI). Estas bacterias sulfatorreductoras son organismos anaeróbicos estrictos. Degradan moléculas orgánicas sencillas para obtener los electrones que utilizan en la cadena respiratoria; a través de ésta obtienen energía. El sulfato, que se reduce a sulfuro, constituye el aceptor final de electrones. Estos microorganismos liberan al medio grandes cantidades de sulfuro de hidrógeno.



FOTOGRAFIAS DE JORDI URMENETA

UN ROBOT EN CADA CASA

El representante más destacado de la revolución de la informática personal pronostica que se avecina el auge de la robótica

Bill Gates

Imagínese que una nueva rama de la industria acaba de nacer. Las técnicas que aplica desbrozan nuevos campos. Un puñado de grandes empresas, bien implantadas, vende equipos muy especializados a otras empresas. Nuevos fabricantes cuyo número crece deprisa producen juguetes innovadores, aparatos para aficionados y artículos destinados a mercados muy determinados. La fragmentación es grande; hay muy pocos estándares o plataformas comunes. Los proyectos son complejos, el progreso lento y escasas las aplicaciones prácticas. Este nuevo sector industrial despierta grandes ilusiones, pero la verdad es que no se sabe cuándo alcanzará su masa crítica, ni siquiera si llegará a alcanzarla. Pero si lo logra, cambiará el mundo.

El párrafo anterior valdría como descripción de la informática a mediados de los años setenta, por la época en que Paul Allen y el autor fundaron Microsoft. En aquel entonces, la administración de compañías y organismos públicos se confiaba a ordenadores mastodónticos y costosos que se encargaban de la facturación, la contabilidad y demás. Los investigadores de las universidades punteras y de los laboratorios industriales estaban poniendo los cimientos de la era de la información. Intel acababa de presentar el microprocesador 8080 y Atari vendía un popular juego electrónico, el Pong. En los clubes informáticos, aficionados llenos de entusiasmo se esforzaban en imaginar para qué podrían servir los nuevos artefactos.

Sin embargo, al escribir ese primer párrafo pensaba en algo mucho más de hoy: en la robótica, que se está desarrollando más o menos como la informática hace treinta años. Los robots industriales de las líneas de montaje de automóviles vienen a ser los macroordenadores de antaño. Corresponderían a mercados específicos los brazos robóticos quirúrgicos, los robots centinelas que eliminan bombas en las calles y carreteras de Irak y Afganistán, así como las aspiradoras robóticas que limpian suelos. Las compañías electrónicas han creado juguetes robóticos que remedan personas, perros o dinosaurios. Y los aficionados desean tener en sus manos la última versión del sistema robótico LEGO.

Mientras tanto, algunos de los mejores cerebros del mundo se esfuerzan por resolver los más difíciles problemas de la robótica, entre ellos el reconocimiento visual, la navegación o el aprendizaje. Y lo están logrando. DARPA (la agencia de proyectos avanzados del Departamento de Defensa de Estados Unidos) ha convocado un concurso, el Gran Desafío, en el que un vehículo robótico ha de

1. LOS ROBOTS DEL FUTURO no se parecerán a las máquinas antropomorfas de la ciencia ficción. Lo más verosímil es que casi todos consistan en dispositivos periféricos móviles, que se encargarán de tareas domésticas concretas.


GRANT
WOOD

efectuar por sus propios medios una difícil travesía de 250 kilómetros a través del desierto de Mojave. En la prueba del año 2004, el mejor de los participantes recorrió sólo 17 kilómetros antes de averiarse. En 2005, fueron cinco los vehículos que cubrieron toda la distancia, y el vencedor de la carrera logró una velocidad media de casi 31 kilómetros por hora. (Otro curioso paralelismo entre las industrias robótica e informática: también DARPA financió los trabajos que desembocaron en la creación de Arpanet, la red precursora de Internet.)

Los propios problemas a que se enfrenta la robótica recuerdan a los que hubimos de resolver en informática hace treinta años. Los fabricantes de robots carecen de sistemas operativos normalizados que permitan que los programas de aplicaciones funcionen en equipos dispares. Apenas si se están estandarizando los procesadores y otros dispositivos de los robots. No abundan los códigos de programación que puedan utilizarse en más de una máquina. Cuando se quiere construir un nuevo robot, por lo general hay que partir de cero.

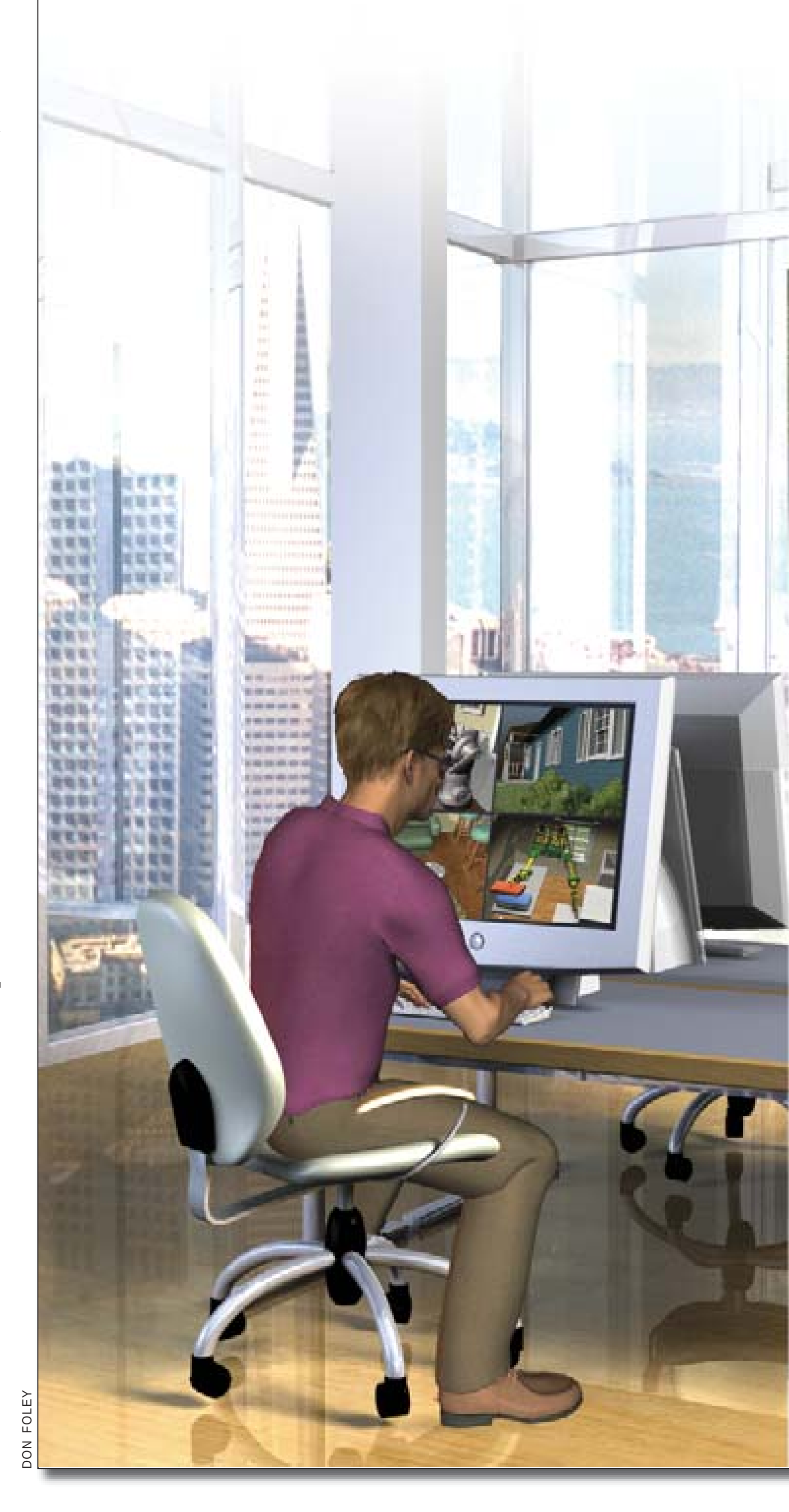
Pese a tales dificultades, cuando hablo con quienes se interesan por la robótica —sean investigadores, empresarios, aficionados o alumnos de instituto—, su apasionamiento y sus esperanzas me recuerdan muchísimo aquellos tiempos en que observaba con Paul Allen la convergencia de las nuevas técnicas y soñábamos con el día en que habría un ordenador en todas las mesas de oficina y en todos los hogares. Y ahora, cuando vuelvo la mirada a las tendencias que comienzan a converger, puedo imaginar un futuro en el que los dispositivos robóticos se conviertan en elementos ubicuos de nuestra vida. Estoy convencido de que un abanico de técnicas —la computación distribuida, el reconocimiento de la voz y de las imágenes, la conectividad inalámbrica de banda ancha— va a abrir las puertas a una nueva generación de artilugios autónomos que lograrán que los ordenadores realicen tareas físicas en nuestro servicio. Puede que nos encontremos en el umbral de una nueva era, en la que los ordenadores personales ya no descansarán en mesas, sino que nos permitirán ver, oír, tocar y manejar objetos en lugares donde no nos hallemos físicamente presentes.

Resumen/*Un futuro de robots*

- La industria robótica se enfrenta a muchos de los mismos problemas que hubieron de resolver los fabricantes de ordenadores personales hace 30 años. Al no existir plataformas y estándares comunes, los ingenieros tienen que partir de cero para construir sus nuevas máquinas.
- Otra dificultad estriba en permitir que los robots perciban y reaccionen con presteza a su entorno. La caída de los costes de la potencia de cómputo y de los sensores permite abordar estos problemas.
- Los ingenieros de robots pueden también sacar partido de nuevos útiles informáticos que facilitan la confección de programas aptos para distintas clases de dispositivos físicos. Las redes de robots inalámbricos podrían explotar la potencia de los PC para habérselas con tareas difíciles, como el reconocimiento de formas o la navegación.

ROBOTS Y ORDENADORES PERSONALES, AMIGOS

La vinculación de robots domésticos y ordenadores personales reportaría muchos beneficios. Desde las oficinas de trabajo, y a través del ordenador que supervisara una red de robots, podríamos vigilar la seguridad del hogar, la limpieza de los suelos, el plegado de la colada o la atención de la madre enferma. Las máquinas se comunicarían por medios inalámbricos, entre sí y con un ordenador doméstico.



DON FOLEY


ROBOT LIMPIASUELOS
ROBOT DISPENSADOR
DE COMIDA Y MEDICINAS
Cámara
Robot
segador
Ordenador
personal
ROBOT
DE ROPERO
ROBOT DE VIGILANCIA

De la ciencia ficción a la realidad

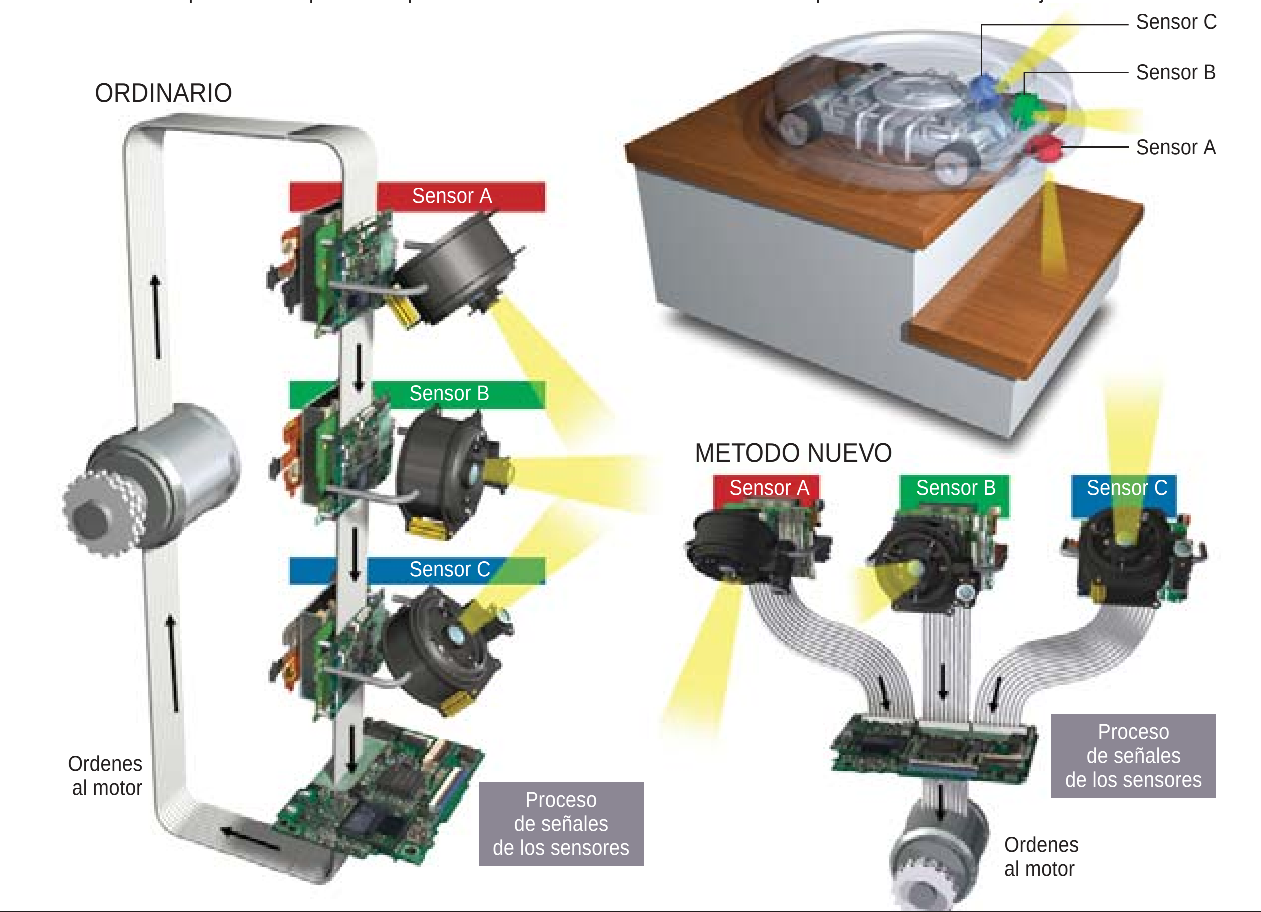
El escritor checo Karel Čapek utilizó ya la palabra “robot” en 1921. Pero el sueño de crear dispositivos de esa índole se remonta miles de años atrás. En las mitologías griega y romana, los dioses de la metalurgia construían sirvientes mecánicos de oro. En el siglo I de la era cristiana, Herón de Alejandría, el gran ingeniero a quien se atribuye la primera máquina de vapor, diseñó unos curiosos autómatas, de uno de los cuales se decía que podía hablar. Se considera que el primer plano de un robot humanoide es un esbozo de Leonardo da Vinci, fechado en 1495, correspondiente a un caballero mecánico, capaz de erguirse y de mover las extremidades.

Las máquinas antropomorfas se convirtieron a lo largo del siglo pasado en iconos familiares de la cultura popular, gracias a libros como *Yo, robot* de Isaac Asimov, películas como *La guerra de las galaxias* o series de televisión como *Star Trek*. La popularidad de los robots en las obras de ficción revela que el público se muestra receptivo a la idea de que estas máquinas lleguen algún día a caminar entre nosotros, como ayudantes e, incluso, como compañeros. Sin embargo, aunque los robots desempeñan ya labores vitales en diversas industrias, por ejemplo en la fabricación de automóviles —donde hay alrededor de un robot por cada diez operarios—, la verdad es que falta un largo trecho para que contemos con robots equiparables a los fabulados por la ciencia ficción.

Una de las razones de ese retraso es la dificultad, muchísimo mayor de la esperada, que presenta conseguir que los robots perciban el entorno y reaccionen a él con rapidez y exactitud. Dotar a los robots de las facultades que los humanos damos por supuestas —la de orientarse con respecto a los objetos de una habitación, responder a sonidos, interpretar el habla o asir objetos de distintos tamaños, formas y texturas— constituye una dificultad extraordinaria. Incluso algo en apariencia tan sencillo como distinguir entre una puerta abierta y una ventana puede resultarle endiabladamente complicado a un robot.

A MEJORES PROGRAMAS, MENOS TROPIEZOS

La gestión de datos procedentes de múltiples sensores —por ejemplo, los tres sensores de infrarrojos que se señalan en el robot de la derecha— plantea un dilema. En el procedimiento ordinario (*abajo*), el programa empieza por leer los datos procedentes de los sensores, los procesa luego y emite órdenes a los motores del robot, antes de repetir el bucle. Pero si el sensor A (*en rojo*) dispone de nuevas lecturas que indican que la máquina se encuentra en el borde de un peldaño y el programa se halla procesando todavía los datos antiguos de los sensores, el robot podría darse un buen golpe. Un método mejor para afrontar semejante problema de “concurrencia” consiste en confeccionar un programa con vías de datos diferentes para cada sensor (*abajo, a la derecha*). En este diseño, las lecturas nuevas se procesan inmediatamente y se aplican frenos al robot antes de que ruede escalera abajo.



DON FOLEY

Pero se está empezando a dar con las soluciones. Una tendencia que ha ayudado mucho es la disponibilidad cada vez mayor de potencia computacional. Un megahertz de potencia de cómputo, que costaba unos 6000 euros en 1970, se puede adquirir ahora por unos céntimos. El precio de un megabit de memoria ha caído de forma parecida. Merced al bajo coste de potencias de cómputo enormes, se pueden abordar problemas arduos que habrá que solucionar antes de que se construyan robots operativos. En la actualidad, los programas de reconocimiento de voz identifican las palabras bastante bien, pero cuesta muchísimo conseguir que las máquinas comprendan esas palabras en un contexto. Conforme siga aumentando la capacidad de cómputo, cabrá resolver cuestiones de complejidad creciente.

Otra barrera que debe superarse es el elevado costo del utillaje material, se trate de los sensores con que el robot determina la distancia de los objetos, o se trate de los motores y servomecanismos necesarios para manipular objetos con la fuerza o la delicadeza necesarias. También aquí los precios están bajando. Los sistemas láser para la determinación precisa de distancias costaban unos ocho mil euros hace pocos años; ahora se pueden adquirir por menos de 2000. Y sensores de nuevo tipo, más precisos, basados en los radares de banda ultraancha, se encuentran en el mercado a precios inferiores.

Los constructores de robots pueden añadir sistemas GPS, cámaras de vídeo, micrófonos matriciales (más adecuados que los normales para distinguir entre una voz y los ruidos ambientales) y toda una diversidad de otros sensores a un costo razonable. Gracias a esa mejor equipación, combinada con la mayor potencia de cómputo y de memoria, los robots actuales aspiran el polvo de las habitaciones o desactivan bombas, tareas que hubieran sido imposibles para una máquina comercial hace sólo unos años.

Un enfoque BASICo

Hablé en febrero de 2004 en varias universidades punteras —Carnegie Mellon, el Instituto de Tecnología de Massachusetts, Harvard, Cornell y estatal de Illinois— sobre el importante papel que puede desempeñar la informática en la resolución de problemas acuciantes para la sociedad. Era mi propósito contribuir a que los estudiantes comprendieran lo apasionantes que pueden ser las ciencias de cómputo, con la esperanza de que algunos de ellos optasen por carreras técnicas. Tras pronunciar mi charla, tuve la oportunidad de conocer en cada universidad algunos de los proyectos de investigación más interesantes de sus departamentos de informática. Casi sin excepción, me fue mostrado al menos un proyecto relacionado con la robótica.

En aquellas fechas, a mis colegas de Microsoft les escribían miembros del mundo académico y de las empresas de robótica interesados en saber si nuestra compañía estaba realizando trabajos en robots que pudieran serles útiles en sus propios proyectos. No era así, por lo que decidimos abordar la cuestión de frente. Le pedí a Tandy Trower, que lleva 25 años en Microsoft y pertenece a mi equipo estratégico, que explorase el panorama a fondo, se pusiera en contacto con los expertos en robótica y averiguase cuál era la situación. Observó un entusiasmo



2. LOS ENSAYOS DINAMICOS de dispositivos móviles en un entorno virtual tridimensional ayudan a los ingenieros de robots a analizar y ajustar sus proyectos antes de ponerlos a prueba en el mundo real. Este sistema, que forma parte del paquete Microsoft Robotics Studio para el desarrollo de programas, permite simular la gravedad y el rozamiento.

CORTESIA DE MICROSOFT

universal por las posibilidades de la robótica, sumado a un generalizado deseo de disponer de útiles que faciliten el desarrollo. "Son muchos quienes consideran que la industria de la robótica se encuentra en una encrucijada técnica, en la que cada vez parece más lógico encaminarse hacia una arquitectura de PC", escribió Tandy en su informe. "Como ha señalado recientemente Red Whittaker, que dirige el equipo de la Carnegie Mellon en el Gran Desafío de DARPA, se dispone de casi todos los medios materiales necesarios; ahora de lo que se trata es de contar con los programas adecuados."

Allá por la infancia del ordenador personal nos dimos cuenta de que se necesitaba un ingrediente que propiciase que los trabajos precursores alcanzasen una masa crítica y se fundiesen en una verdadera industria que generase productos comerciales útiles. Ese ingrediente que faltaba resultó ser el Microsoft BASIC. Al crear este lenguaje de programación en los años setenta, proporcionamos la fundamentación común que permitiría que programas desarrollados para unos dispositivos determinados funcionasen también en otros. BASIC facilitó, además, la programación de ordenadores, lo que atrajo cada vez a más estudiosos hacia la informática. Aunque han sido muchos quienes realizaron aportaciones esenciales al desarrollo del ordenador personal, Microsoft BASIC fue uno de los catalizadores de las innovaciones en equipos y programas que posibilitaron la revolución del ordenador personal.

Después de leer el informe de Tandy, me pareció evidente que antes de que la robótica pudiese dar el mismo salto cualitativo que la industria del PC dio hace treinta años, había que obtener ese ingrediente del que aún se carece. Le pedí, en consecuencia, que organizase un pequeño equipo dispuesto a trabajar con expertos en robótica, a fin de crear un sistema de herramientas de programación que proporcionase la "fontanería" esencial para que quien se interese por los robots, aunque sólo posea unas nociones elementales de programación de ordenadores, pueda escribir sin dificultad aplicaciones robóticas que funcionen en distintos tipos de dispositivos. El objetivo consistía en ver si era factible el mismo tipo de cimentación común, de bajo nivel, para integrar dispositivos y programas en diseños robóticos que en su día había proporcionado el Microsoft BASIC para la programación de ordenadores.



3. EL NACIMIENTO DE UNA INDUSTRIA. Los ingenieros de robots han venido ofreciendo numerosas máquinas útiles, distintas en su diseño. Stanley (*arriba*), vehículo autónomo construido por el equipo Stanford Racing Team, venció en el Gran Desafío de DARPA: atravesó casi 210 kilómetros de desierto sin conductor. La casa iRobot fabrica el Packbot EOD (*en la página siguiente*), con el que se desactivan bombas en Irak, y el Roomba (*a la derecha*), que aspira el polvo de suelos entarimados y alfombras. Lego Mindstorms (*más a la derecha*), juego de herramientas para construir y programar robots, ha sido el producto más vendido en la historia del Grupo Lego, el fabricante de juguetes danés.

El grupo de robótica de Tandy ha contado con técnicas desarrolladas por un equipo que trabaja bajo la dirección de Craig Mundie, el director jefe de investigación y estrategia de Microsoft. Una de ellas contribuirá a resolver el problema más correoso con el que se enfrentan los proyectistas de robots, el de la "concurrencia": la gestión simultánea de datos que llegan desde diversos sensores cuando hay que enviar las órdenes adecuadas a los motores del robot.

Una forma de proceder consiste en preparar un programa tradicional, con una sola "hebra" de instrucciones: un largo bucle que primero lee los datos de los sensores, seguidamente los procesa y, por último, entrega una salida que determina el proceder del robot, antes de volver a recorrer el bucle. Sus deficiencias saltan a la vista: si nuestro robot tiene datos nuevos que indican que se encuentra al borde de un precipicio, pero el programa se halla todavía en la parte baja del bucle, calculando trayectorias y diciéndoles a las ruedas que han de girar más deprisa porque aún se basa en datos anteriores, hay una buena probabilidad de que el robot caiga por las escaleras antes de que pueda procesar la nueva información.

El problema de la concurrencia trasciende la robótica. Con el aumento diario de las aplicaciones escritas para redes distribuidas de ordenadores, los programadores deben esforzarse para orquestar eficientemente códigos que funcionan en muchos servidores a un mismo tiempo. A medida que se van sustituyendo los ordenadores provistos de un solo procesador por máquinas con varios procesadores y procesadores de núcleos múltiples, es decir, circuitos integrados que cuentan con dos o más procesadores uncidos para reforzar el rendimiento, los programadores precisarán formas nuevas de programar aplicaciones de escritorio y sistemas operativos. Para sacar pleno partido de la potencia de los procesadores que operan en paralelo, la nueva programación ha de resolver el problema de la concurrencia.

Una de las formas de gestionar la concurrencia consiste en la confección de programas multihebra, que conducen las transferencias de datos por muchas rutas. Pero quien haya escrito este tipo de código dará fe de su extrema dificultad. La solución ideada por el equipo de Craig para el problema de la concurrencia se denomina "ejecución en concurrencia y coordinación" (CCR). Consiste en una biblioteca de funciones —secuencias de código de programa para realizar funciones concretas— que facilitan la redacción de aplicaciones multihebra para coordinar cierto número de actividades simultáneas.

Aunque proyectada para que a los programadores les resultase menos arduo sacar provecho de la potencia de los sistemas multiprocesador y multinucleados, la biblioteca CCR ha resultado ideal también para la robótica. Apoyados en esa biblioteca, los diseñadores de robots reducen enormemente las posibilidades de que una de sus creaciones tropiece contra una pared porque sus programas estén tan ocupados enviando señales a las ruedas que no puedan leer la información que les llega desde los sensores.

Además de afrontar el problema de la concurrencia, los trabajos del grupo de Craig simplifican la redacción de aplicaciones robóticas distribuidas merced a los "servicios de programación descentralizados" (DSS), que permite crear aplicaciones en las cuales los servicios —las partes del programa que leen un sensor, pongamos por caso, o que controlan un motor— operen como procesos separados, que podemos orquestar de forma muy parecida a como se procede para agregar, en una misma página Web, textos, imágenes e información procedentes de distintos servidores.

Puesto que los DSS permiten que los componentes de los programas funcionen por separado, en el caso de que uno de los componentes del robot falle podremos apagarlo y reiniciarlo —e incluso sustituirlo— sin tener que hacer lo mismo con la máquina en sí. Esta arqui-



tectura, combinada con las técnicas de comunicación inalámbrica de banda ancha, facilita la supervisión y el ajuste de robots desde posiciones remotas, por medio de un navegador de la Red.

Más todavía: una aplicación DSS que controle un dispositivo robótico no tiene por qué residir entera en el robot propiamente dicho. Puede repartirse entre varios ordenadores. Abarataría el robot, al delegar las tareas complejas de procesamiento en los equipos de alto rendimiento incluidos hoy en los ordenadores personales. Estoy convencido de que este progreso dejará expedito el camino para una clase inédita de robots, que, en esencia, serán dispositivos periféricos móviles de control inalámbrico que se servirán de la potencia de los PC de sobremesa para desempeñar tareas que exijan un procesamiento informático intensivo, como el reconocimiento óptico o la orientación y navegación. Y como estos dispositivos pueden interconectarse en red, es de esperar que veamos la aparición de grupos de robots concertados para cartografiar el lecho marino o encargarse de la siembra.

Las técnicas mencionadas forman una parte esencial de Microsoft Robotics Studio, un nuevo paquete de desarrollo informático elaborado por el equipo de Tandy. Microsoft Robotics Studio cuenta también con útiles que facilitan la creación de aplicaciones robóticas por medio de un amplio abanico de lenguajes de programación. Sirva de ejemplo una herramienta de simulación destinada a que los programadores de robots sometan a prueba sus aplicaciones en un entorno virtual tridimensional, antes de lanzarlas al mundo real. El objetivo de esta producción es crear una plataforma abierta, con un precio aceptable, que permita a los ingenieros de robots una integración sencilla de soporte lógico y elementos materiales en sus proyectos.

¿Deberá llamárselos robots?

¿Cuánto tardarán los robots en formar parte de nuestra vida cotidiana? Según la Federación Internacional de Robótica, en 2004 operaban ya dos millones de robots personales en todo el mundo. Hacia 2008 habrá otros siete millones. El Ministerio de Información y Comunicaciones de Corea del Sur confía en tener un robot en cada hogar de su país hacia 2013. La Asociación de Robótica japonesa pronostica que hacia 2025 la industria de robots personales facturará unos 40.000 millones de euros anuales; hoy se mueve en torno a los 4000 millones.

Lo mismo que con la industria de los ordenadores personales de los años setenta, resulta imposible pronosticar con exactitud cuáles serán las aplicaciones que tirarán de este nuevo sector industrial. Todo apunta a que los robots cumplirán una función principal en la asistencia a las personas de edad avanzada, a las que incluso podrían prestar compañía. Es probable también que llegue a haber dispositivos robóticos que ayuden a un mejor desenvolvimiento de personas con minusvalías, potencien la fuerza y la resistencia de soldado y auxilien a trabajadores de la construcción o profesionales sanitarios. Los robots servirán para el mantenimiento de equipos industriales peligrosos, para el manejo de sustancias tóxicas o para la supervisión de oleoductos en parajes remotos. Permitirán a médicos y personal sanitario el diagnóstico y el tratamiento de pacientes situados quizás a miles de kilómetros, y desempeñarán un papel crucial en los sistemas de seguridad y en las operaciones de búsqueda y rescate.

Es posible que algunos robots del futuro puedan parecerse a los artefactos antropomórficos de *La guerra de las galaxias*, pero en su mayoría no tendrán nada en común con el humanoide C-3PO. Conforme se vayan extendiendo los dispositivos periféricos móviles, quizá resulte más difícil decir qué es un robot. Considerando el grado de especialización y ubicuidad de las nuevas máquinas —sin remoto parecido con los autómatas bípedos de la ciencia ficción—, es probable que ni siquiera las llamemos robots. Pero a medida que estos dispositivos vayan quedando al alcance del público, cambiarán quizá la forma en que trabajamos, nos comunicamos, aprendemos y nos entretenemos, igual que la transformaron los ordenadores personales en los últimos treinta años.

El autor

Bill Gates es cofundador y presidente de Microsoft, el mayor productor de programas informáticos del mundo. Mientras estudiaba en Harvard en los años setenta, desarrolló una versión del lenguaje de programación BASIC para el primer microordenador, el Altair de MITS. En su segundo año de universidad, Gates abandonó Harvard para dedicar sus energías a Microsoft, compañía que fundó en 1975 con Paul Allen, amigo de la infancia.

Bibliografía complementaria

Se dispone de más información sobre robótica en:

Center for Innovative Robotics. **www.cir.ri.cmu.edu**

DARPA Grand Challenge: **www.darpa.mil/grandchallenge/**

International Federation of Robotics: **www.ifr.org**

The Robotics Alliance Project: **www.robotics.nasa.gov**

Robotics Industries Association: **www.roboticsonline.com**

The Robotics Institute: **www.ri.cmu.edu**

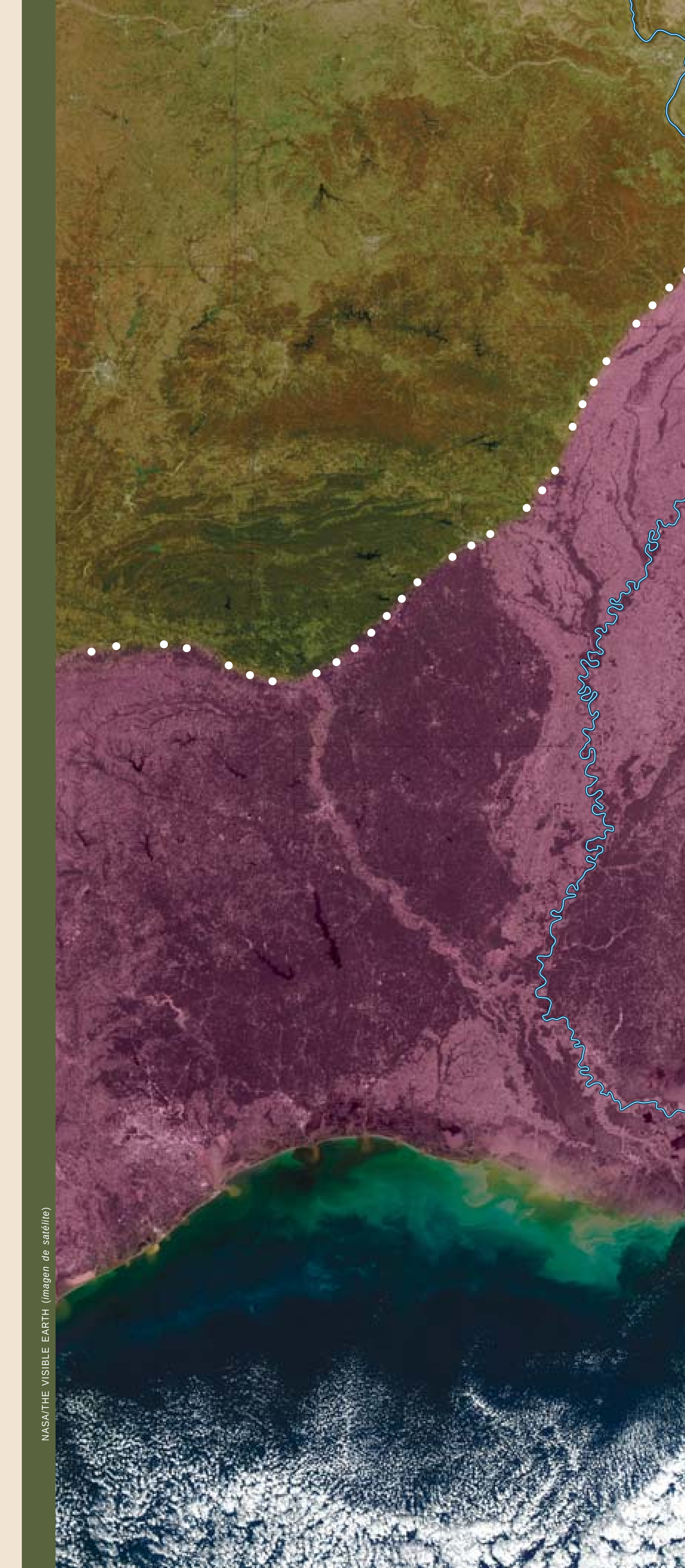
The Tech Museum: Robotics: **www.thetech.org/robotics/**

Puede encontrarse información técnica y otros detalles sobre Microsoft Robotics Studio en **msdn.microsoft.com/robotics**

Hubo un tiempo en el que las montañas separaban del golfo de México el interior continental de Estados Unidos. La investigación geológica nos revela el modo en que se abrió esa barrera, dejando paso al río hasta el golfo de México

Si abrimos un mapa del mundo, observaremos que los continentes que rodean el océano Atlántico encajan a la perfección como piezas gigantescas de un rompecabezas. Basta con desplazar el Africa Occidental hacia la costa este de Norteamérica y el extremo septentrional de Sudamérica hacia el golfo de Guinea. Esa era la disposición de los continentes hace cientos de millones de años; los geólogos la conocen, en parte, por las huellas que dejaron los movimientos de las placas tectónicas asociados a la formación del supercontinente.

Al este de EE.UU., la colisión con Africa hizo ascender los Apalaches hasta altitudes semejantes a las de las montañas Rocosas. El impacto de Sudamérica originó las montañas Ouachita, de orientación oeste-este (a lo largo de Oklahoma y Arkansas), que se unieron a los Apalaches meridionales. Luego, la que una vez fuera la cordillera Ouachita-Apalaches, se dividió en dos, dejando paso al río Mississippi en su curso hacia el golfo de México. La explicación para esta separación (que venimos investigando desde hace 10 años) guarda relación con otros misterios de la geología de Norteamérica: ¿por



1. LA SECCION MERIDIONAL del río Mississippi (*azul*) fluye por una región en herradura de baja altitud (*púrpura*) que separa las montañas de Ouachita, al oeste, de los Apalaches, al este. Esta formación característica, la depresión del Mississippi, debe su existencia al paso de Norteamérica sobre un punto caliente geológico, una intensa fuente de calor situada cerca del núcleo terrestre.

NASA/THE VISIBLE EARTH (*imagen de satélite*)



La formación del Mississippi

Roy B. Van Arsdale y Randel T. Cox

qué hallamos diamantes en Arkansas? ¿Por qué, de todos los lugares posibles, el mayor terremoto registrado en EE.UU. ocurrió en Missouri y no en California ni Washington?

La brecha que en la actualidad separa de los Apalaches las montañas de Ouachita, la depresión del Mississippi (una bahía colmatada de sedimentos, conocida en inglés con el término “embayment” del Mississippi), constituye una de las mayores y desconocidas formas del relieve del centro de Estados Unidos. Esa extensión en herradura aloja cantidades enormes de arena y limos depositados en una bahía del antiguo golfo de México, que cubrieron esta región hace unos 85 millones de años (durante el final del Cretácico, cuando los dinosaurios recorrían aún la Tierra) y no retrocedieron hasta decenas de millones de años después.

Podríamos suponer que los depósitos se formaron al anegar, las aguas del golfo, las zonas bajas del continente; al retirarse, habrían dejado tras de sí una fina capa de sedimentos. Pero no fue así. Descubrimientos recientes han revelado que la base de esos sedimentos se halla a 2,6 kilómetros bajo el actual nivel del mar. Por tanto, esta parte del continente debió experimentar un descenso notable, de suerte que cualquier río que antaño hubiera drenado el vasto interior continental hacia el norte o el oeste habría cambiado su trayectoria y fluido hacia el sur, convirtiéndose en nuestro Mississippi. Pero, ¿por qué se hundió el continente?

Orogénesis

La respuesta a este enigma geológico nos retrotrae a la época en que los trilobites medraban abundantes, antes que se formara la depresión del Mississippi. Durante la mayor parte del Paleozoico (hace entre 245 y 545 millones de años), la región que más tarde se convertiría en los EE.UU. se encontraba rodeada por un océano. Pero hace 300 millones de años (cuando evolucionaron los primeros reptiles), las masas continentales que andando el tiempo constituirían Norteamérica, Suramérica, Africa y Eurasia se unieron para integrar el supercontinente Pangea. Las gigantescas colisiones asociadas a esta formación provocaron la ascensión de varias cordilleras montañosas, entre las que se incluye la cadena Ouachita-Apalaches. Durante los 70 millones de años siguientes, esta cordillera de orientación este-oeste dividió el interior de un vasto continente. Los ríos que nacieron en esas montañas drenaban hacia el sur, la futura Sudamérica, o hacia el norte, lo que se convertiría en Norteamérica.

Hace unos 230 millones de años (cuando aparecieron los primeros dinosaurios), Pangea empezó a dividirse. Como era de suponer, se separó allí donde previamente se había suturado: justo por fuera del arco Ouachita-Apalaches. Esta abertura originó el océano Atlántico y el golfo de México. En la actualidad, el Atlántico continúa en expansión; el golfo de México, en cambio, dejó de ensancharse hace unos 145 millones de años (cuando empezó la evolución de las aves).

Durante decenas de millones de años, las montañas de Ouachita-Apalaches constituyeron una cadena continua a lo largo del margen septentrional del golfo de México. Mientras existió esa barrera, el interior continental no se habría drenado en sentido sur, hacia el golfo. Así lo indica la geología del golfo de México. Durante este prolongado intervalo de tiempo, el margen septentrional del golfo cobijó arrecifes coralinos de banco que más tarde se convertirían en los poderosos depósitos calizos, repletos de petróleo, que se han descubierto en el subsuelo, de Florida al norte de México. Los corales no sobreviven cubiertos de limos y arcillas, por lo que no es posible que un río de las dimensiones del Mississippi vertiera sus sedimentos en el golfo en el transcurso de ese período.

Durante ese lapso tan prolongado, la costa del golfo permaneció geológicamente estable; ningún continente se le acercaba o alejaba. Sin embargo, la tregua se rompió hace unos 95 millones de años. Desde entonces, y durante los 10 millones de años siguientes, la corteza se deformó y ascendió a lo largo de una extensa región, desde Luisiana meridional hasta el sur de Missouri y desde lo que hoy es el río Tennessee hasta Little Rock, en Arkansas, el vestigio de la cual corresponde a la actual depresión del Mississippi.

De ello resultó un arco montañoso extenso, de orientación noreste, que se erigió hasta altitudes imponentes: quizá dos o tres kilómetros sobre el nivel del mar (el altiplano del Himalaya se halla hoy a cinco kilómetros sobre el nivel del mar). Las pruebas de la existencia de esa vasta región elevada sobre la depresión del Mississippi son indirectas: las gravas que se han hallado en algunos yacimientos al este, cuya investigación ha puesto de manifiesto que hubo corrientes de gran intensidad que drenaban hacia el exterior de las cumbres recién creadas, transportando la grava hacia el este, hasta que caían en cascada.

Los argumentos más convincentes sobre tan extensa ascensión provienen de lo que *no* se ha encontrado en la depresión del Mississippi: más

Resumen/*Abriendo paso a un río*

- Hubo un tiempo en que las montañas Ouachita de Arkansas y Oklahoma se unían a los Apalaches meridionales; formaban una cordillera que obligaba a los ríos del interior continental a fluir hacia el norte o el oeste hasta desembocar en el mar.
- El desplazamiento de Norteamérica sobre un punto caliente, de actividad reanudada, provocó, en el Cretácico Medio, que al norte del golfo de México ascendiera una parte de esta cordillera, creando un arco. La acción de los agentes atmosféricos erosionó esas montañas jóvenes, lo que aplanó su altitud hasta igualarlas al nivel de las tierras colindantes.
- A medida que la región se alejaba del punto caliente, la tierra subsidió; el océano invadió entonces una vasta zona donde desembocaron los ríos que drenaban el continente. El actual río Mississippi continúa fluyendo hacia el sur, a través de los sedimentos que colmatan la depresión.
- El desplazamiento de Norteamérica sobre puntos calientes explica también los terremotos que han sacudido algunas regiones del interior continental.

CHRISTOPHER R. SCOTESE *PALEOMAP Project (Globos paleogeográficos del Triásico, Cretácico Temprano y Cretácico Tardío)*

de tres kilómetros de grosor de roca formada antes del Cretácico Superior. La ausencia de esa masa rocosa en el eje del bajío resulta evidente. Los estratos habrían desaparecido por la erosión, tras haber ascendido sobre el nivel del mar durante un período de 10 millones de años. (Los territorios elevados se hallan muy expuestos a la acción constante del clima, que a lo largo del tiempo geológico erosiona hasta las mayores montañas para aplanarlas.)

El siguiente episodio de importancia fue la subsidencia de la depresión. Aconteció hace entre 80 y 24 millones de años. Durante ese intervalo, la región previamente levantada de dos a tres kilómetros de altitud se movió en sentido contrario y se hundió, a una profundidad de igual magnitud, bajo el nivel del mar. Lo que había constituido la cúspide de una cordillera montañosa elevada quedó inundada por el mar y enterrada bajo más de 2,6 kilómetros de sedimentos marinos.

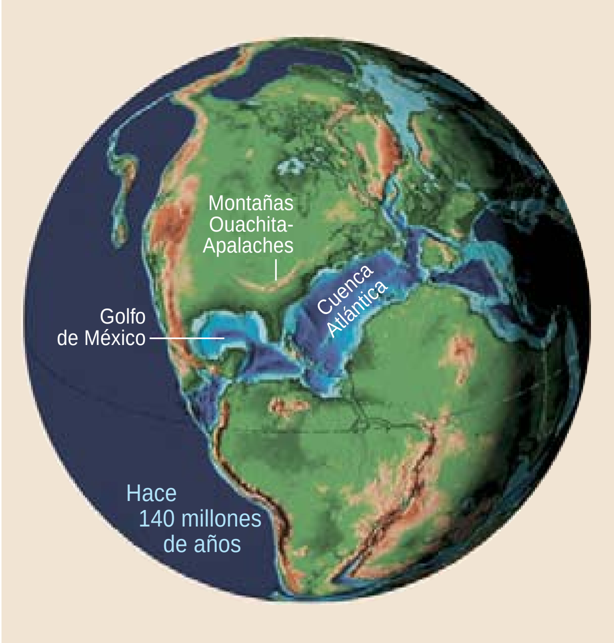
El punto caliente de las Bermudas

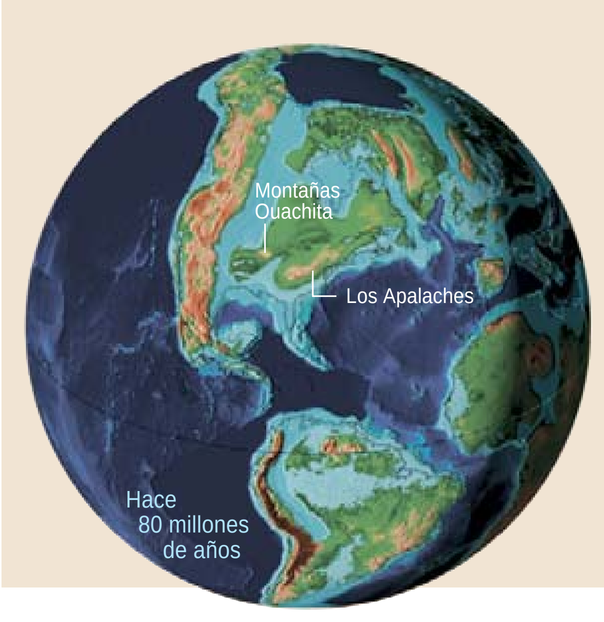
¿Qué proceso habría provocado la ascensión de una región tan extensa del planeta y causado luego el inicio de su hundimiento en un intervalo geológico tan corto? Parece que la depresión del Mississippi pasó por encima de un punto caliente del manto, una fuente de calor excepcionalmente intenso situada a gran profundidad (con probabilidad, cerca de la base del manto terrestre, la zona más gruesa del interior de la Tierra, entre el núcleo y la corteza). Sobre esas fuentes de calor, la roca ardiente asciende atravesando cerca de 3000 kilómetros de manto y corteza hasta llegar a la superficie.

Cuando una placa tectónica pasa por encima de un punto caliente, acostumbran generarse alineaciones de volcanes en la superficie; pensemos en la cadena de las islas Hawai. Se disponen uno detrás de otro o bien se agrupan en una cresta continua.

Lo que nos indujo a pensar en la implicación de un punto caliente fue la revisión de los modelos existentes sobre el movimiento de las placas tectónicas en Norteamérica. A tenor de los modelos, el centro y el este de los EE.UU. se habían desplazado sobre el punto caliente de las Ber-







Orogénesis

Las reconstrucciones de la tectónica de placas muestran la evolución de la barrera montañosa que impedía a los ríos del interior de Norteamérica fluir hacia el sur, tal y como lo hace el Mississippi en nuestros días.

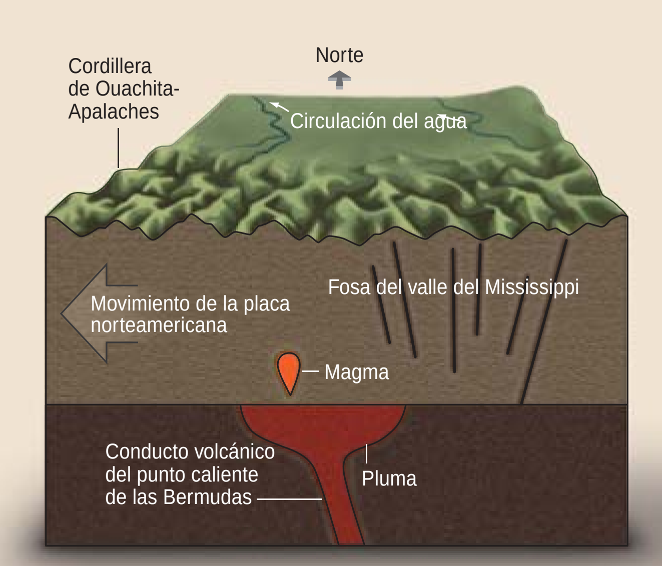
Hace unos 200 millones de años (*arriba*), los continentes del planeta se unieron en uno solo: formaron el gigantesco supercontinente Pangea. Las colisiones continentales en la configuración de este supercontinente provocaron el ascenso de cordilleras montañosas, incluida la que se extendía entonces como una línea continua por los extremos sur y este de la placa norteamericana. Los ríos que drenaban el interior continental no podían atravesar una barrera tan imponente; hubieron de rodear por el norte y el oeste para desembocar en el mar.

El conjunto Ouachita-Apalaches constituía una cordillera montañosa hasta que el Yucatán se desvió hacia el sur y la placa africana se separó de Norteamérica. El movimiento de las placas tectónicas, a principios del Cretácico (hace unos 140 millones de años), creó el golfo de México y una parte sustancial de la moderna cuenca oceánica del Atlántico (*centro*).

Al final del Cretácico (hace unos 80 millones de años), una gran depresión dividió esta cordillera al norte del golfo de México, formando una inmensa bahía. Por aquel entonces, el nivel del mar era más alto, razón por la cual el océano inundó las regiones más bajas del planeta (*abajo*).

SEPARACION DE UNA CORDILLERA

La que una vez constituyó la cordillera Ouachita-Apalaches quedó partida en dos por la depresión del Mississippi, formado después que esta





1 En el Cretácico Inferior, la pluma de roca ardiente y ascendente originada por el punto caliente de las Bermudas se situaba al oeste de la fosa de hundimiento que constituía el valle del Mississippi, una zona de fallas antiguas y pronunciadas. La cordillera Ouachita-Apalaches forzaba a los ríos continentales a fluir hacia el norte y el oeste para desembocar en el mar.

2 El movimiento de la placa tectónica situó a la fosa de hundimiento del valle del Mississippi sobre el punto caliente de las Bermudas durante el Cretácico Medio, cuando la actividad de estas fuentes de calor profundas había aumentado en todo el planeta. El magma emergió a través y a lo largo de las fallas; alimentó esta región con materiales adicionales y, al propio tiempo, provocó la expansión térmica de la parte superior de la placa. El resultado fue una vasta zona elevada: el arco de la depresión del Mississippi.

JEN CHRISTIANSEN

mudas (llamado así porque más tarde generó el edificio volcánico que subyace en las islas). Este movimiento transcurrió durante parte extensa del tiempo de ascensión de la zona de la depresión del Mississippi. El desplazamiento explicaría que el magma ascendente del punto caliente de las Bermudas hubiera levantado la corteza y provocado, por acción térmica, su expansión (abombamiento).

Constituyen una prueba directa de este fenómeno determinadas formas volcánicas. Denominadas diatremas de kimberlita, en ellas se han hallado diamantes. De hecho, las rocas ígneas, generadas por enfriamiento del magma, se encuentran de manera intermitente en varios lugares que alguna vez pasaron por encima del punto caliente de las Bermudas. Estas rocas ígneas se extienden desde el centro de Kansas, donde su antigüedad es de 115 millones de años, hasta el centro de Mississippi, donde su antigüedad desciende a 70 millones de años, una secuencia cronológica que coincide con el desplazamiento este-oeste de Norteamérica sobre el punto caliente.

Así pues, lo mismo que causó el ascenso de la depresión del Mississippi causó su hundimiento posterior. El levantamiento originó un arco montañoso cuyas cumbres se extendían a lo largo de la línea que en la actualidad sigue el río Mississippi. Pero durante 10 millones de años, la acción del clima erosionó las montañas altas hasta igualarlas al nivel del mar. Entonces, cuando la depresión del Mississippi se alejó del punto caliente de las Bermudas, se enfrió la corteza, se contrajo y subsidió hasta una profundidad máxima de 2,6 kilómetros bajo el nivel del mar.

Puede resultar sorprendente que la tierra descendiera tanto. Sin embargo, recordemos que la región se aupó hasta alturas de entre dos y tres kilómetros sobre el nivel del mar, para sufrir a continuación una erosión tenaz. Por tanto, tras enfriarse y hundirse, la corteza no recuperó su configuración original, merced al desmantelamiento del equivalente a dos o tres kilómetros de roca suprayacente. Se formó así una depresión, inundada por agua procedente del golfo de México.

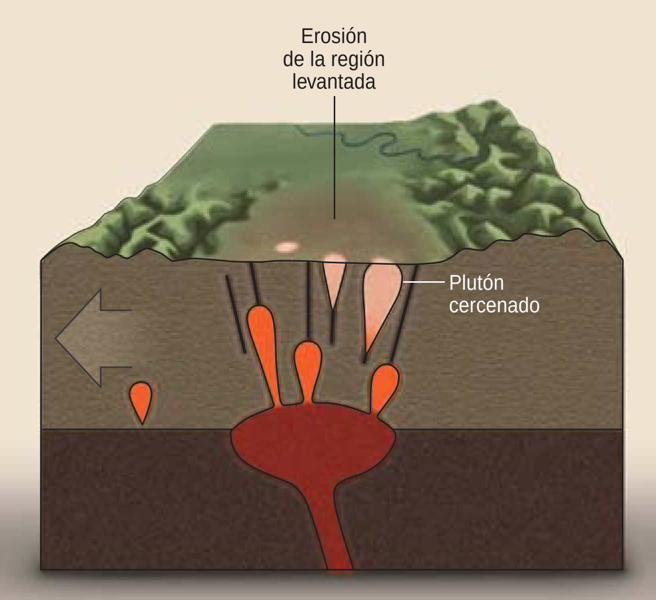
Una mirada más atenta a las rocas diamantíferas de Arkansas respalda nuestra interpretación de la ascensión de la corteza y su hundimiento posterior. La naturaleza de esas rocas implica que los magmas originales ascendieron desde el manto hasta profundidades someras de la corteza, de alrededor de un kilómetro bajo la superficie, donde se solidificaron.

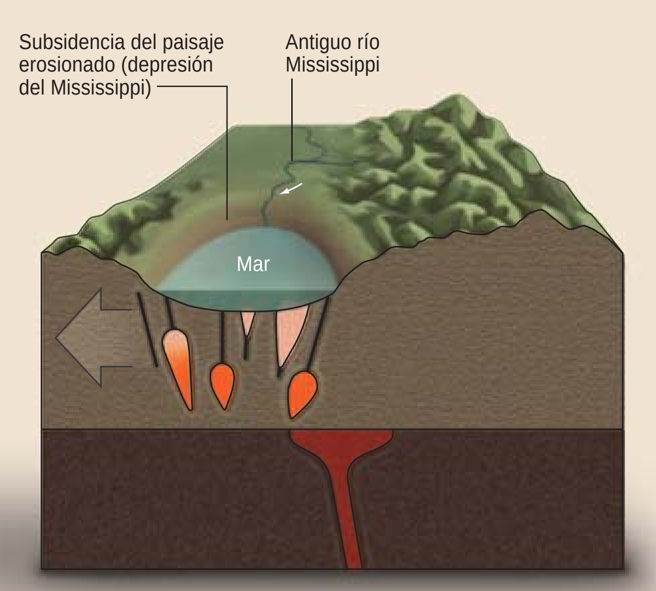
A mayor abundamiento, ciertas investigaciones geológicas revelan que, a lo largo del eje de la depresión, tales masas rocosas sufrieron una intensa erosión. Luego, quedaron sepultadas bajo los depósitos del Cretácico Superior: justo lo que cabría esperar si el ascenso y la erosión estuvieran acompañados por la inyección de magma, antes del hundimiento de la corteza bajo el nivel del mar, permitiéndole al océano inundar la depresión y colmatarla de sedimentos marinos.

Puntos débiles

Dos aspectos de nuestra hipótesis parecen no encajar en esta recreación geológica: la cresta del arco

región del continente pasara sobre un punto caliente. Las cuatro figuras ilustran la génesis de la depresión.





3 La climatología erosionó muy pronto el terreno recién levantado. El desgaste de lo que había sido un arco montañoso elevado, descabezó las secciones superiores de algunos plutones ígneos. Estos cuerpos de roca cristalina procedían de magma que, tras ascender desde grandes profundidades, se había enfriado y solidificado antes de alcanzar la superficie. Su cercenación constituye uno de los indicios de que tal erosión tuvo lugar.

4 En el Cretácico Superior, después que la fosa de hundimiento del valle del Mississippi se alejara del punto caliente de las Bermudas, la región que había sido levantada se enfrió y hundió; el mar, entonces con un nivel elevado, invadió la zona. Los ríos continentales, entre ellos el antiguo Mississippi, fluyeron hacia el sur, hacia la nueva depresión, que de forma gradual se colmató de sedimentos.

montañoso y el punto caliente de las Bermudas.

En primer lugar, la cresta del arco montañoso que había ocupado la depresión del Mississippi se extendía desde el sudoeste hacia el nordeste, casi en ángulo recto respecto al "trazado" del punto caliente de las Bermudas (la línea que señala los lugares que en algún momento estuvieron directamente sobre esta persistente fuente de calor). Si el punto caliente provocó la formación del arco montañoso, ¿por qué su trazado no se alinea con la cresta?

En realidad, esta incongruencia no es tan grave como parece. En el fondo del océano Atlántico, cerca de la ubicación actual del punto caliente de las Bermudas, se encuentra la Elevación de las Bermudas, una formación geológica orientada hacia el noreste donde el fondo marino se arquea hacia arriba. También estas montañas submarinas presentan una disposición casi perpendicular al trazado del punto caliente. Ello suele explicarse por el hecho de que el fondo marino de esta región está afectado por un sistema de fallas inclinado, de orientación nordeste-sudoeste, que atraviesa la corteza. El magma ascendente que formó las elevaciones debió emerger por esas líneas de fractura, levantando el fondo marino en regiones alejadas del punto caliente.

De ser eso cierto, quedaría superado el primer punto débil de nuestra teoría, pues bajo la depresión del Mississippi hay antiguas fallas de rift de inclinación noreste. Estas fracturas de la corteza habrían canalizado el magma originado en el punto caliente de las Bermudas, creando un paisaje elevado que se extendía del sudoeste al noreste.

La segunda posible objeción a nuestra propuesta emerge de una pregunta obvia: teniendo en cuenta las pocas huellas que dejó en Norteamérica, ¿por qué el punto caliente de las Bermudas tuvo un efecto tan notable en la zona de la depresión del Mississippi? La respuesta gira en torno al dato siguiente: el punto caliente de las Bermudas se hallaba bajo esa depresión durante un período de la historia de la Tierra en que los puntos calientes expulsaron enormes cantidades de magma por todo el planeta. A ese intervalo de pronunciado magmatismo y producción térmica se le conocía en geología por episodio de superpluma [*véase* "Superpluma del Cretácico Medio", Roger L. Larson, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1995]. (Existen otras manifestaciones de este particular evento: por ejemplo, la formación de numerosas diatremas diamantíferas de kimberlita.) La corteza fallada de la depresión del Mississippi se habría encontrado en el lugar preciso en el momento adecuado, justo cuando intensificó su actividad el inofensivo punto caliente de las Bermudas.

Parece ser, pues, que el paso de la placa tectónica de Norteamérica sobre el punto caliente de las Bermudas, de actividad reanudada, constituye un factor clave para entender por qué una región otrora montañosa terminara en depresión. Este cambio fue suficiente para modificar el drenaje del interior continental: llevó el agua que con anterioridad fluía hacia el norte o el oeste, hasta el golfo de México.

Las huellas de los puntos calientes

El paso de Norteamérica sobre el punto caliente de las Bermudas y el del Gran Meteoro se ilustra mediante el trazado de estos puntos calientes (*línea discontinua naranja* que marca las zonas de la superficie que han cabalgado por encima de tales fuentes de calor profundas). Ambos puntos calientes condicionaron la placa tectónica norteamericana. La prolongación de la depresión hacia el nordeste es el resultado del paso de magma procedente del punto caliente a través y a lo largo de fallas preexistentes (*líneas amarillas en la región de la depresión*); el mismo fenómeno explica la prolongación noreste-sudoeste de la elevación de las Bermudas en el fondo oceánico. Las montañas submarinas de Nueva Inglaterra resultaron del desplazamiento de la placa por encima del punto caliente del Gran Meteoro. El paso de Norteamérica sobre estos dos puntos calientes reactivó antiguas fallas en el centro norteamericano, en los rifts del valle del Mississippi y de San Lorenzo, implicadas en los terremotos que se han desencadenado cerca del extremo meridional del sistema de rift de Norteamérica central: en Nuevo Madrid (Missouri), en Charleston (Carolina del Sur) y alrededor del río San Lorenzo en Canadá.



JEN CHRISTIANSEN

Terremotos

Nuestra tesis recibe el respaldo de un episodio geológico más reciente (de hace menos de dos siglos). El 7 de febrero de 1882, el mayor terremoto registrado en los EE.UU. destruyó la ciudad de Nuevo Madrid (Missouri). El temblor fue de tal magnitud (alrededor de 8 puntos en la escala de Ritchter, según las estimaciones sismológicas), que pudo modificar el curso del Mississippi en un instante.

Podría parecer extraño que una catástrofe de tamaño alcance sacudiera un interior continental tranquilo, alejado de los deslizamientos y la molienda que se dan en los bordes de las placas tectónicas, donde los terremotos constituyen fenómenos habituales. Sin embargo, los seísmos de centro de placa suceden en lugares donde la corteza es antigua y está fallada. Nuevo Madrid se encuentra sobre una antigua estructura fracturada conocida como el rift del valle del Mississippi (o “Reelfoot”). Con todo, la mayoría de las regiones con fallas antiguas no suelen sufrir terremotos. Ejemplo de ello es la costa este americana, que, a pesar de instalarse sobre una corteza fragmentada por un rift, hace tiempo que no se ha visto afectada por ningún terremoto.

Un indicio de lo que hace la corteza fallada subyacente a la depresión del Mississippi más propensa a sufrir terremotos procede de Charleston (Carolina del Sur). Región de alta sismicidad, fue sacudida por un gran temblor en 1886. Igual que Nuevo Madrid, Charleston se encuentra sobre una corteza antigua y fallada. Además, ambas regiones pasaron en algún momento sobre el punto caliente de las Bermudas. Hacia el oeste, la anomalía sísmica del extremo meridional del sistema de rift central de Norteamérica, cerca de Manhattan (Kansas), descansa sobre el trazado del punto caliente de las Bermudas. La región de mayor actividad sísmica del Canadá oriental, el rift de San Lorenzo, coincide con el trazado de otro punto caliente: durante el Cretácico, esta parte del Canadá cabalgó



2. UN TERREMOTO sacudió Charleston (Carolina del Sur) en 1886. La causa fue el deslizamiento producido a lo largo de antiguas fallas, una respuesta tardía al paso de la zona sobre el punto caliente de las Bermudas hace unos 60 millones de años.

J. B. MACELWANE ARCHIVES, UNIVERSIDAD DE SAN LUIS Y BIBLIOTECA CAROLINIANA DEL SUR, UNIVERSIDAD DE CAROLINA DEL SUR

por encima del punto caliente del Gran Meteoro (llamado así por el monte submarino de ese nombre, sito en el océano Atlántico), donde se ha producido vulcanismo submarino en tiempos geológicos recientes.

Por lo que parece, el desplazamiento de una placa tectónica sobre un punto caliente reactiva fallas antiguas; ello provoca deslizamientos ocasionales que se repiten de vez en cuando, incluso millones de años después, a causa del prolongado espacio de tiempo que la corteza necesita para asentarse y, de nuevo, calentarse y ascender. Nuestra tesis, por tanto, no sólo arroja luz sobre la formación de la depresión del Mississippi, sino que da cuenta, además, de la sismicidad notable que se registra en zonas de Norteamérica oriental alejadas de los bordes de placa.

Que fenómenos tan dispares como los terremotos de Canadá y los diamantes de Arkansas encajen en nuestro guión teórico sobre la formación de la depresión del Mississippi ratifica su validez. Además, resulta sumamente interesante pensar que el curso del Mississippi estuvo controlado por procesos que se daban a 2900 kilómetros de distancia y en las profundidades de la Tierra, en el límite entre el núcleo y el manto. Tan sorprendente conclusión trae a un primer plano el ligamen entre las partes de nuestro planeta fascinante.

Los autores

Roy B. Van Arsdale, catedrático de la Universidad de Memphis, ha consagrado los últimos 15 años al estudio de la geología de la zona sísmica de Nuevo Madrid. **Randel T. Cox** enseña en la Universidad de Memphis. Centra su trabajo en la evolución del valle del Mississippi y las regiones colindantes, la documentación de terremotos históricos en los EE.UU. centrales y Centroamérica, y los efectos geológicos de los puntos calientes volcánicos.

Bibliografía complementaria

La Zona Sísmica del Mississippi. Arch C. Johnston en *Investigación y Ciencia,* n.º 69, págs. 32-42; junio, 1982.

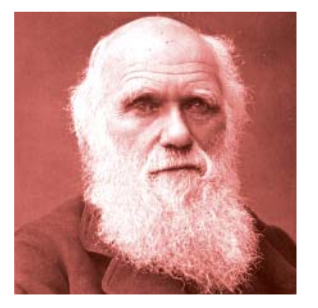
Latest Pulse of Earth: Evidence for a Mid-Cretaceous Super Plume. Roger L. Larson en *Geology*, vol. 19, págs. 547-550; 1991.

Hotspot Origin of the Mississippi Embayment and Its Possible Impact on Contemporary Seismicity. Randel T. Cox y Roy B. V Arsdale en *Engineering Geology*, vol. 46, págs. 201-216; 1997.

The Mississippi Embayment, North America: A First Order Continental Structure Generated by the Cretaceous Superplume Mantle Event. Randel T. Cox y Roy B. V Arsdale en *Journal of Geodynamics*, vol. 34, págs. 163-176; 2002.


Biología evolutiva
del cáncer
CARL ZIMMER

La selección natural carece de poder para eliminar el cáncer en nuestra especie. Según algunos científicos, pudiera incluso haber facilitado medios para el desarrollo de tumores



1. CHARLES DARWIN, 1881.

La selección natural no es la perfección natural. Los seres vivos han logrado, por evolución, adaptaciones de una complejidad sobresaliente, pero siguen siendo vulnerables a las enfermedades. Entre las formas más trágicas —y las más enigmáticas— de esos males se encuentra el cáncer. Un tumor canceroso se halla exquisitamente bien adaptado para sobrevivir de acuerdo con su índole deleznable.

Las células cancerosas continúan su proceso de división más allá de lo que lo haría una célula normal. Destruyen los tejidos adyacentes para acomodarse; engañan al organismo para que les suministre la energía que necesita su propagación desaforada. Pero los tumores que nos afligen no corresponden a parásitos extraños que hayan adquirido estrategias refinadas para atacar nuestro cuerpo. Constan de células nuestras, que se han rebelado contra nosotros. Tampoco los cánceres constituyen rarezas insólitas y estrafalarias: una mujer estadounidense tiene un 39 por ciento de probabilidades de sufrir algún tipo de cáncer; un varón, un 45 por ciento.

RICHARD MILNER ARCHIVES

Para el experto en biología evolutiva, el cáncer viene a ser un rompecabezas deprimente y fascinante, a un tiempo. Si la selección natural posee capacidad suficiente para producir adaptaciones complejas, que van desde el órgano de la visión hasta el sistema inmunitario, ¿por qué no ha logrado eliminar el cáncer? La respuesta, aducen estos biólogos, se encuentra en el propio proceso evolutivo. La selección natural ha favorecido ciertas defensas contra el cáncer, pero no lo ha erradicado. Más aún: la selección natural podría incluso haber proporcionado de forma involuntaria algunos de los recursos de que se valen las células cancerosas para su desarrollo.

El estudio de la evolución del cáncer está todavía en la infancia, con un intenso debate sobre los mecanismos implicados. Queda mucho camino por recorrer en la contrastación experimental de las hipótesis enfrentadas. Algunos clínicos se muestran escépticos sobre las posibilidades terapéuticas de tales trabajos. Por su parte, los biólogos admiten que se hallan lejos de descubrir una terapia contra la enfermedad, pero aducen que el conocimiento de la historia evolutiva del cáncer revelaría vías de ataque que de otra forma permanecerían ocultas.

Los albores del cáncer

En su raíz, el cáncer se debe a la pluricelularidad. Nuestros antepasados unicelulares se reproducían por escisión en dos. Tras la aparición de los animales, hace unos 700 millones de años, las células que integraban su cuerpo siguieron reproduciéndose por división en dos, haciendo uso de la maquinaria química que heredaron de sus progenitoras. Las células, al dividirse, empezaron también a especializarse, a constituir tejidos diversos e integrarse en ellos. Los complejísimos organismos pluricelulares que poseen los animales modernos han sido posibles merced a la aparición de genes nuevos, que controlan la forma en que se dividen las células; por ejemplo, mediante la suspensión de su proliferación en los órganos, una vez que éstos han alcanzado el tamaño adulto.

Resumen/*Oncología evolutiva*

- La selección natural dispone de una capacidad limitada para impedir el cáncer. Ha proporcionado algunas defensas, pero éstas tienden a retrasar la patología hasta fases tardías de la vida, no a erradicarla.
- Las fuerzas evolutivas parecen haber favorecido ciertos genes que contribuyen al desarrollo o agresividad del cáncer.
- La comprensión de la historia evolutiva del cáncer, y de la forma en que un tumor evoluciona en el cuerpo, sugeriría nuevas vías de ataque contra la enfermedad.

Los millones de especies que existen hoy dan testimonio del éxito evolutivo que supuso la adquisición de un cuerpo. Pero el organismo pluricelular se halla expuesto a un grave riesgo. Cada vez que en él se divide una célula, el ADN de ésta tiene cierta posibilidad de experimentar una mutación cancerígena. Con palabras de Judith Campisi, del laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, cada vez que una célula se divide, corre el riesgo de convertirse en tumoral.

Determinadas mutaciones, muy raras, pueden ser responsables de que una célula se descontrole y empiece a multiplicarse sin restricciones. Otras mutaciones agravan el problema: pueden consentir que células desorganizadas invadan los tejidos vecinos o se difundan por el organismo. O pueden hacer que las células tumorales eludan las defensas del sistema inmunitario, e incluso atraer hacia sí nuevos vasos sanguíneos que las alimenten y les suministren oxígeno.

Los cánceres operan en nuestro cuerpo una recreación del proceso evolutivo que guía la adaptación de los seres vivos al medio donde viven. En el nivel de los organismos, la selección natural interviene cuando las mutaciones génicas provocan que algunos organismos alcancen mayor éxito reproductivo que otros; las mutaciones resultan "seleccionadas" en el sentido de que perduran y aumenta su frecuencia en las generaciones subsiguientes.

En un cáncer, el papel de los organismos lo interpretan las células. Las alteraciones cancerígenas en el ADN hacen que algunas células se reproduzcan con mayor eficacia que las normales. Incluso en el seno de un mismo tumor, las células mejor adaptadas pueden expulsar de la competición a las menos hábiles. Es una suerte de evolución darwinista en el interior de un órgano, apuntaba Natalia Komarova, de la Universidad de California en Irvine.

Limitación de las defensas

Aunque nuestro cuerpo sea vulnerable al cáncer, cuenta con numerosos medios para detenerlo. Es probable que las estrategias resultaran de la selección natural, pues las mutaciones que evitaron a nuestros antepasados una muerte precoz comportaron un éxito reproductivo. Sin embargo, ante los millones de personas que cada año desarrollan un carcinoma, parece manifiesto que tales defensas no han erradicado la patología. Los biólogos se han propuesto averiguar las limitaciones de los mecanismos defensivos mediante el estudio de la evolución.

Entre las defensas más eficaces contra el cáncer se cuentan las proteínas oncosupresoras. De ciertas investigaciones se infiere que

algunas de estas proteínas podrían impedir la tumoración mediante la supervisión e inspección del modo de reproducción de cada célula. Si se multiplica de forma anormal, las proteínas instan su muerte o las inducen a un proceso de senescencia, en el que la célula sobrevive, aunque carece de capacidad para reproducirse. Las proteínas oncosupresoras desempeñan una función básica en nuestra supervivencia. Pero se ha descubierto en ellas un aspecto sorprendente: ¿nos iría mucho mejor no tenerlas?

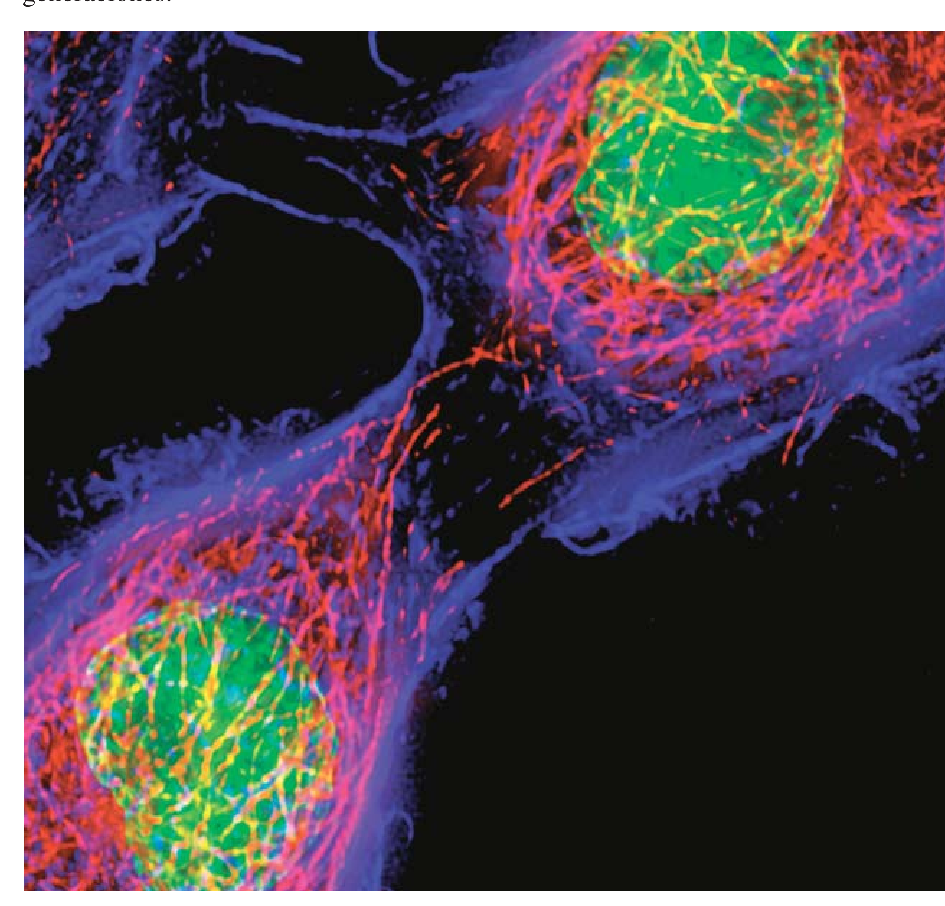
El grupo que dirige Norman E. Sharpless, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, creó ratones transgénicos para estudiar los efectos de la proteína supresora p16 (o con mayor propiedad, p16-Ink4a). La cepa de ratones carecía de un gen funcional para p16; en consecuencia, los ratones de esa línea no producían la proteína. En septiembre de 2006, publicaron tres estudios sobre la investigación realizada. De acuerdo con lo previsto, los múridos mostraron mayor susceptibilidad al cáncer de la que presentarían cuando contasen sólo un año de edad. Pero la pérdida del gen *p16* entrañaba también un aspecto positivo.

En efecto, cuando los ratones envejecían, sus células se comportaban todavía como si fueran jóvenes. En uno de los experimentos se estudiaron ratones de edad avanzada: algunos contaban con genes *p16*; otros no. Se destruyeron las células productoras de insulina en el páncreas de todos los animales. Los múridos normales, incapacitados para la producción de insulina, padecieron una diabetes letal. Los que carecían de proteína p16, en cambio, desarrollaron sólo una diabetes leve y sobrevivieron. Las células progenitoras de las células insulínicas se multiplicaban todavía con prontitud; repoblaron el páncreas con células de repuesto. Se observaron resultados parecidos en el examen de células sanguíneas y cerebrales de los ratones: la p16 les defendía del cáncer, pero también provocaba su envejecimiento.

Los resultados anteriores vienen a avalar la hipótesis de Campisi, según la cual la selección natural operaría en favor de las proteínas antitumorales, como la p16, aunque sólo con moderación; si éstas se tornan demasiado agresivas, se convierten en una amenaza para la salud, pues promueven una senescencia precoz.

Retrasar lo inevitable

Para resultar favorecida por la selección natural, una defensa contra el cáncer no tiene por qué erradicar la enfermedad. Si retrasa los tumores hasta la vejez, tal vez permita que los individuos así protegidos produzcan, en promedio, más descendencia que los desprotegidos. Puede parecer cruel que la evolución haya de penalizar a los ancianos con cáncer, pero, como recuerda Jarle Breivik, de la Universidad de Oslo, la selección natural no favorece a los genes porque vayan a permitirnos vivir más tiempo y ser más felices, sino por la capacidad de propagar su información a través de las generaciones.

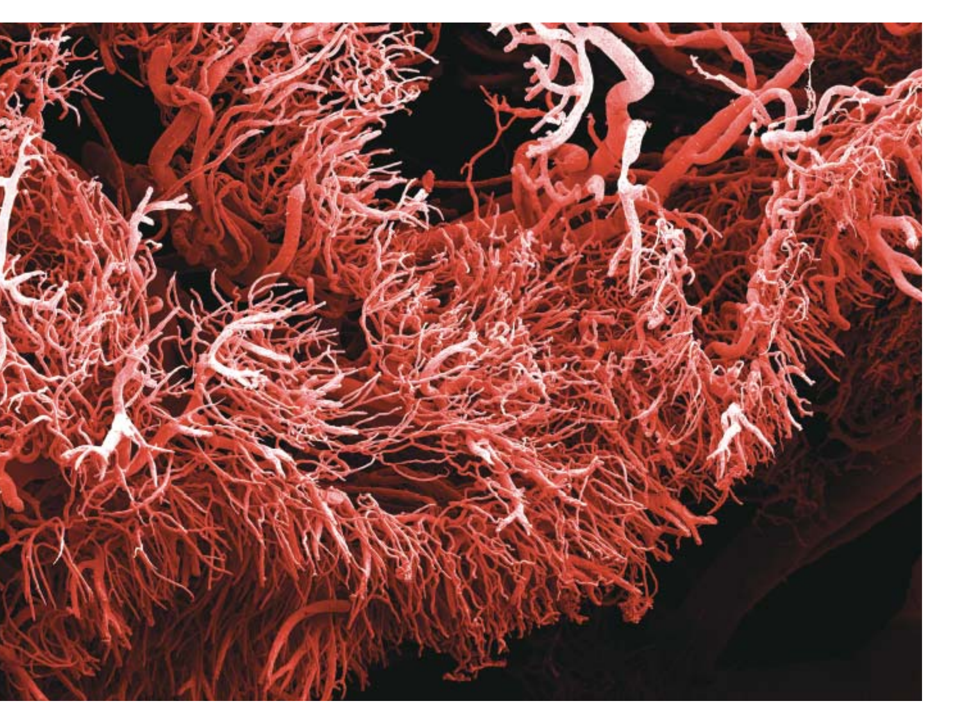


PAUL ANDREWS *Universidad de Dundee/Photo Researchers, Inc.*

2. CELULA en la etapa final de la división.

La proteína p16 y otros polipéptidos antitumorales pueden favorecer a los jóvenes frente a los viejos. Cuando la p16 obliga a una célula a entrar en senescencia, la célula no sólo deja de multiplicarse, sino que empieza también a producir un desequilibrio proteico. Entre las proteínas que sintetiza se encuentra el factor de crecimiento vascular endotelial (VEGF), que activa la angiogénesis. El VEGF promueve el desarrollo de tumores mediante el suministro de un plus de nutrientes. En los individuos jóvenes, el efecto principal de p16 puede ser la eliminación de las células cancerígenas. Con el tiempo, sin embargo, puede crear una población creciente de células senescentes, que a los ancianos los haría más vulnerables al cáncer.

Otra forma de retrasar el cáncer consiste en establecer varias líneas de defensa. La investigación sobre cáncer de colon nos muestra, a este respecto, que las células del



3. VASOS SANGUINEOS de un tumor (vaciado en resina).

colon han de experimentar varias mutaciones antes de volverse malignas. Ello no impide la adquisición del cáncer de colon —de hecho, es el tercero de los tumores más frecuentes—, pero quizá reduzca las probabilidades de que los jóvenes lo padezcan. La edad media de los individuos diagnosticados es de 70 años.

No todos los cánceres golpean a los ancianos, desde luego. La mayoría de las víctimas del retinoblastoma (cáncer de retina) son niños. Leonard Nunney, de la Universidad de California en Riverside, atribuye a la evolución tal diferencia entre los dos cánceres. En su opinión, las células del colon se enfrentan a un número de posibilidades de sufrir mutaciones peligrosas mayor que las células retinianas. El colon es un órgano de tamaño notable; consta de muchísimas células, que continúan replicándose durante toda la vida del sujeto, conforme el epitelio se va renovando sin cesar (las células viejas van dejando sitio a otras nuevas). La magnitud del riesgo confiere un valor evolutivo elevado a las defensas que se oponen al proceso de tumoración de las células del colon.

La retina, en cambio, corresponde a una mínima parcela de tejido. Ese pequeño conjunto de células retinianas deja de multiplicarse en el niño hacia la edad de cinco años. Al reducirse el número de divisiones celulares, disminuye también la probabilidad de tumoración de la retina. En consecuencia, el retinoblastoma resulta extraordinariamente raro: afecta sólo a cuatro individuos por millón. Dado que el riesgo es harto menor, la selección natural no promueve la difusión de defensas nuevas contra el retinoblastoma. La posesión de defensas contra el cáncer de retina tendría escasa influencia sobre el éxito reproductor de una población.

Armamentario contra tumores

La selección natural podría haber alterado ciertos genes para que aumentara el riesgo de células cancerígenas. Se ha descubierto esta preocupante posibilidad al estudiar los cambios que en el curso de la evolución terminaron por configurar nuestra especie humana singular. Tras la separación, hace unos seis millones de años, de nuestra línea que nos alejó de otros primates, nuestros antepasados hubieron de superar la selección natural conforme se adaptaban a nuevos modos de vida, constituidos en homínidos que deambulaban por la sabana y se valían de útiles.

Los expertos distinguen entre genes que no han experimentado cambios de importancia desde el origen de los homínidos, y genes que sí han sufrido una modificación notable en virtud de la presión selectiva. Entre los genes que han experimentado los cambios más llamativos se cuentan algunos que desempeñan funciones principales en el cáncer.

Se sospecha que las ventajas adaptativas que estos genes han aportado compensan los daños que pudieran causar. Uno de estos genes carcinógenos evolucionados determina la proteína ácido graso sintasa (FAS, de “fatty acid sinthase”). Las células normales se valen de la FAS para sintetizar algunos de sus propios ácidos grasos, que utilizan para numerosas funciones (formación de membranas y almacenaje de energía, entre otras).

En los tumores, sin embargo, las células cancerosas producen FAS a un ritmo mucho más veloz. Esta proteína reviste para ellos una importancia tal, que el bloqueo de la actividad del gen correspondiente mata células cancerosas. Mediante la comparación de la secuencia génica del *FAS* de los humanos y de otros mamíferos, Mary J. O’Connell, de la Universidad de Dublín, y James McInerney, de la Universidad nacional de Irlanda, han descubierto que este gen ha pasado por un intenso proceso de selección natural en los humanos.

Aunque McInerney desconoce qué misión peculiar cumple en los humanos la FAS, le intriga una hipótesis avanzada en los años noventa por David Horrobin. Sostenía este psiquiatra que el impresionante aumento de tamaño y potencia del cerebro humano fue posible merced al advenimiento de nuevas clases de ácidos grasos. Las neuronas necesitan ácidos grasos para fabricar las membranas y establecer conexiones. En la opinión de McInerney, uno de los factores que habrían favorecido un tamaño cerebral mayor sería la capacidad para la síntesis de grasas.

CLOUDS HILL IMAGING LTD. *Photo Researchers, Inc.*

Junto con esa facultad pudo haber llegado un nuevo útil, que las células cancerígenas habrían secuestrado para sus propios fines. Las células tumorales podrían servirse de la FAS como fuente adicional de energía.

Muchos de los oncogenes de evolución rápida producen proteínas en tejidos implicados en la reproducción; por ejemplo, en la placenta. Bernard Crespi, de la Universidad Simon Fraser de Columbia Británica, y Kyle Summers, de la Universidad de Carolina del Este, sostienen que estos genes forman parte de una pugna evolutiva librada entre madre e hijo.

La selección natural actúa en favor de los genes que permiten al niño extraer de su madre la máxima nutrición posible. El feto produce la placenta, que crece y se implanta de forma agresiva en los tejidos de la madre, de la que extrae los nutrientes necesarios. Ese requerimiento pone al feto en conflicto con su madre. La selección natural favorece también a los genes que permiten que la madre alumbre hijos sanos. Si una madre sacrifica demasiado en un embarazo, la probabilidad de tener hijos sanos disminuye. Por esa razón la madre produce compuestos que ralentizan el flujo de nutrientes hacia el feto.

A medida que las madres han venido desarrollando, en el curso de la evolución, nuevas estrategias para el racionamiento de nutrientes al feto, la selección natural ha venido primando las mutaciones que permiten al feto superar tales estrategias. Según Crespi, se trata de un tira y afloja sobre lo mucho, o lo poco, que el feto va a tomar de la madre.

Los genes que facilitan a las células la construcción de una placenta más eficaz son secuestrados por células cancerosas; quedan así activados, cuando en condiciones normales permanecerían silentes. La capacidad para estimular la angiogénesis y el crecimiento agresivo le resulta útil tanto a una placenta como a un tumor. Se trata de algo susceptible de ser malversado en favor de linajes de células cancerígenas. Ofrece la posibilidad de que las mutaciones creen instrumentos utilizables por las células cancerígenas para adueñarse del cuerpo.

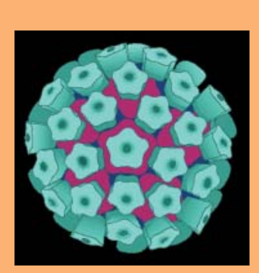
Con todo, y a pesar de que la activación de estos genes, de ordinario apacibles, pueda aumentar la potencia de los cánceres, cabe presumir que la selección natural los haya favorecido; por un motivo poderoso: contribuyen al crecimiento del feto. Cuando ese niño cuente ya 60 años, podría aumentar la probabilidad de cáncer. Aun así, el gen será seleccionado por sus vigorosos efectos positivos iniciales.

Los espermatocitos constituyen, también, un tipo celular de multiplicación rápida. A diferencia de las células placentarias, que proliferan sólo durante varios meses, los espermatocitos operan a lo largo de la vida. Los varones producen sin cesar, durante decenios, una cantidad enorme de espermatozoides. Explica Andrew Simpson, del Instituto Ludwig de Investigación del Cáncer de Nueva York, que los genes que se ocupan de la especificidad de tales células se cuentan entre los de más rápida evolución del genoma humano. Un gen que posibilite que unas células espermáticas se dividan con mayor prontitud que otras aumentará su

Evolución de un virus oncogénico

La Sociedad Norteamericana del Cáncer estima que el 17 por ciento de los casos —más de 1,8 millones al año en EE.UU.— están provocados por virus y otros agentes infecciosos. Entre tales patógenos se numera el virus del papiloma, responsable de más de la mitad del millón de cánceres cervicales que se diagnostican anualmente. El virus provoca que las células hospedadoras se sigan dividiendo mucho después de que las células normales hubieran dejado de hacerlo; impide también que las hospedadoras reparen las mutaciones que sufre su ADN.

Se ha llevado a cabo la reconstrucción parcial de la historia evolutiva del virus del papiloma mediante la secuenciación y comparación del genoma de cientos de tipos de virus. Los papilomavirus, que integran una familia extensa, aparecen en casi todos los vertebrados; suelen engendrar verrugas u otros crecimientos benignos. Pero con la llegada de *Homo sapiens* —hará unos 200.000 años en Africa— nuestros antepasados eran ya portadores de una serie de cepas capaces de infectar a nuestra especie, aunque no a otros animales. Entre las cepas había tipos oncogénicos.



PAPILOMAVIRUS humano (imagen computarizada).

Unos 100.000 años después, *Homo sapiens* —y los virus con él— se expandió desde Africa hasta otros continentes. Al ir quedando aisladas unas de otras las diversas poblaciones humanas, permanecieron aisladas también sus cepas de papilomavirus. Por ello, la genealogía de los virus del papiloma humano refleja la genealogía humana. El linaje más frecuente de estos virus en africanos contemporáneos es precisamente el más antiguo. Los nativos americanos descienden de poblaciones asiáticas; sus virus comparten ese parentesco.

Semejante coevolución reviste interés clínico, pues los virus parecen haberse adaptado a sus huéspedes. Un informe publicado en agosto de 2006 en el *Journal of the National Cancer Institute* se ocupaba de la persistencia de diversos tipos de virus en distintos grupos étnicos. Una mujer que resulte infectada por un virus asociado desde antiguo con su grupo étnico será portadora del virus más tiempo que si el patógeno corresponde a otro tipo de virus.

Se está investigando el mecanismo evolutivo de ciertos papilomavirus benignos que les convierte en malignos. Los descubrimientos que puedan hacerse revestirán suma importancia para las vacunas antivíricas que se están introduciendo. La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense (FDA) ha aprobado una vacuna contra la cepa más peligrosa del virus del papiloma humano, la H16. Pero los estudios evolutivos indican que, en raras ocasiones, los tipos humanos de papilomavirus se han trocado entre sí genes que participan en la instalación del cáncer. La epidemia de VIH, de alcance planetario, podría incrementar el riesgo de este trueque génico. Conforme el VIH debilita el sistema inmunitario del individuo, aumenta el número de tipos de papilomas humanos con capacidad invasora y de coexistencia. Esta confraternización podría dar origen a una nueva cepa oncogénica para la cual las vacunas actuales verían recortada su eficacia.

LINDA M. STANNARD *Universidad de Ciudad del Cabo/Photo Researchers, Inc.*

frecuencia relativa en la población de células seminales de ese individuo. Ello entraña que aumentará también la probabilidad de que ese gen se instale en un óvulo fecundado y, por ende, se transmita a generaciones futuras.

Para nuestro infortunio, los genes que favorecen la rápida formación de espermatozoides operan también a favor de células cancerígenas de desarrollo célere. En condiciones normales, las células somáticas impiden que estos genes se transcriban en proteínas. En las células cancerosas, en cambio, parece que las mutaciones los desbloquean, lo que permite que las células se multipliquen con prontitud.

El cómo y el porqué

Los expertos en biología evolutiva confían en que sus investigaciones contribuirán a combatir el cáncer. Además de aclarar por qué la evolución no lo ha erradicado, sus trabajos pueden arrojar luz sobre uno de los problemas más correosos que afrontan los oncólogos: la aparición de tumores resistentes a la quimioterapia.

Los fármacos de quimioterapia pierden a menudo su eficacia contra las células cancerosas. Tal proceso guarda una estrecha semejanza con la aparición de resistencias a los medicamentos antivirales en el tratamiento del VIH. Las mutaciones que hacen que las células cancerosas sobrevivan a la quimioterapia facultan a las células tumorales para expulsar a las células más vulnerables.

Merced al desentrañamiento del mecanismo evolutivo del VIH y otros patógenos se han podido crear nuevas estrategias para evitar la aparición de resistencias. Ahora se está investigando de qué modo la comprensión de la evolución del interior tumoral podría llevarnos a una aplicación eficaz de la quimioterapia.

Los conceptos que explora la biología evolutiva son bastante nuevos para la mayoría de los oncólogos. Algunos han reaccionado con entusiasmo. Simpson, por ejemplo, cree que la descodificación de la rápida evolución que opera sobre los genes espermáticos sería de gran ayuda en la lucha contra los tumores que se apoderan de los genes en cuestión.

También a Bert Vogelstein, del Instituto Médico Howard Hughes, le parece útil el estudio del cáncer a través de una lente evolutiva. Opina que el planteamiento evolutivo del cáncer encaja con la visión oncogenista porque, en cierto sentido, el cáncer corresponde a un efecto secundario de la evolución.

No le apasiona a Vogelstein, en cambio, la importancia de los oncogenes de evolución rápida. Conviene andar con cautela y asegurarse de que se está mirando el genoma entero, con absoluta imparcialidad. McInerney, por su parte, se ha propuesto subsanar un vacío importante: nuestra carencia de estudios sistemáticos. Algunos oncólogos no esconden su escepticismo. Christopher Benz, del Instituto Buck de Investigación sobre el Envejecimiento, declara que las explicaciones evolutivas no deberían aceptarse mientras no se sometan a contrastación experimental, lo mismo que cualquier otra hipótesis científica.

Crespi atribuye la postura escéptica a las diferencias de enfoque entre los biólogos evolucionistas y los oncólogos: quienes dedican sus esfuerzos a combatir el cáncer se ocupan del *cómo*, mientras que los evolucionistas indagan el *porqué*. Quizás al plantearse cuestiones distintas, los biólogos podrían arrojar luz en los debates entre oncólogos.

Cánceres parasitarios

El sarcoma de Sticker, un cáncer canino, se transmite por contacto sexual; también, al lamer o tocar un tumor. Una vez establecido en un nuevo huésped, produce tumores que crecen hasta el tamaño de una uva antes de desaparecer de forma gradual. En un principio se pensó que esta enfermedad, lo mismo que el cáncer cervical, se propagaba a través de virus. Ahora se sabe que las propias células cancerosas se trasladan de un perro a otro; han seguido esa vía de transmisión durante siglos.

Un equipo de expertos del Colegio Universitario de Londres y de la Universidad de Chicago han analizado los genes de células del sarcoma de Sticker de perros de todo el mundo. Han hallado que los tumores guardan una semejanza génica entre sí más estrecha que con los perros en los que se han desarrollado. Se ha confirmado ulteriormente que los tumores pertenecen a un mismo linaje de células cancerígenas. Parece que la evolución habría llevado a una célula cancerígena a convertirse en un parásito, diseminado por todo el mundo.

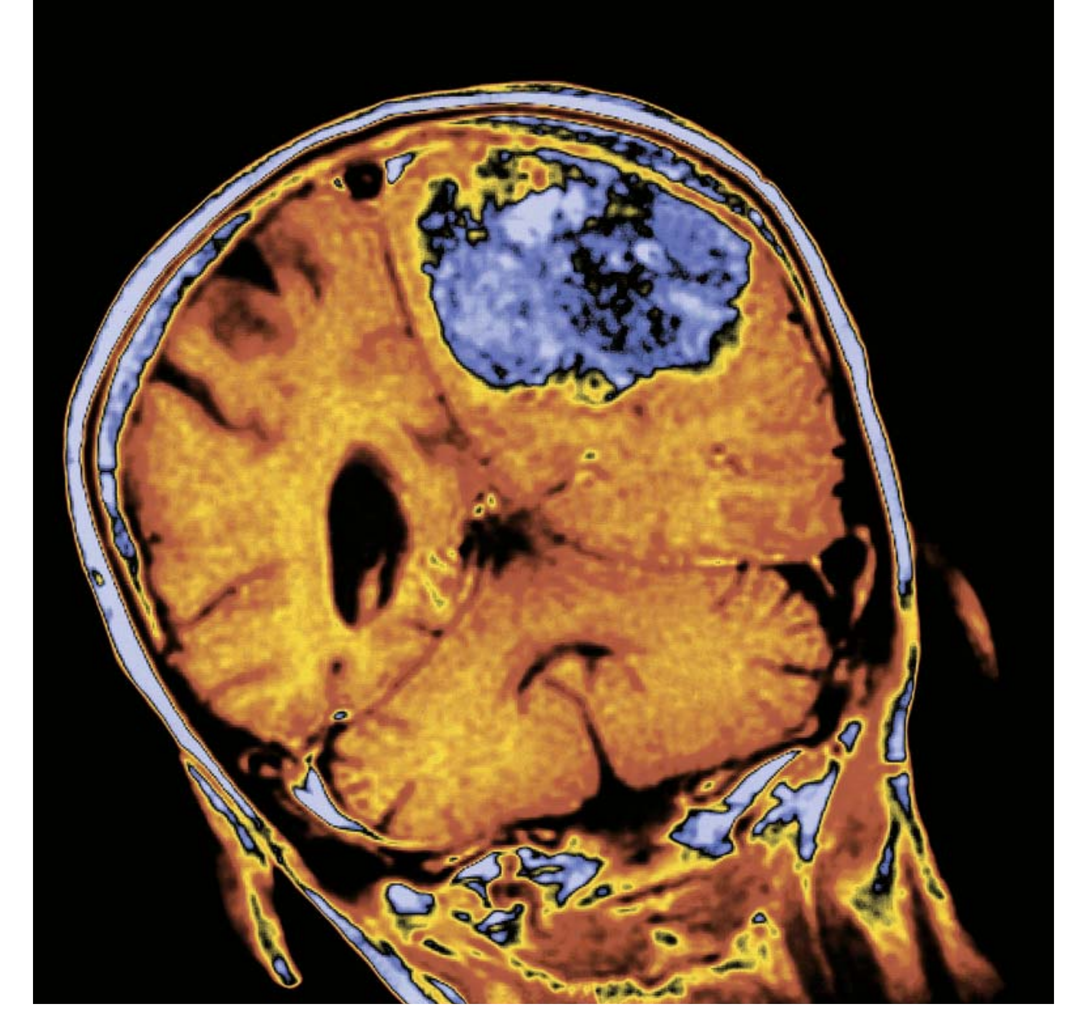


UN HUSKY pudo haber empezado la difusión de células del sarcoma de Sticker entre otros perros, hace cientos de años.

Se han identificado escasos ejemplos de cánceres parasitarios. Los diablos de Tasmania, por ejemplo, se contagian un tumor facial al morderse unos a otros. ¿Por qué no hay más cánceres parasitarios? Los trasplantes de órganos pueden darnos una pista. Uno de los máximos peligros del trasplante estriba en el rechazo: el sistema inmunitario del receptor ataca violentamente al órgano trasplantado. Todos los vertebrados rechazan el implante de tejidos foráneos. Cabe que semejante respuesta agresiva haya evolucionado hace millones de años como forma de defensa frente a los cánceres parasíticos.

El sarcoma de Sticker parece haber logrado eludir, por vía evolutiva, tan arraigada defensa. Las células tumorales fabrican muy pocas de las proteínas superficiales que los vertebrados utilizan para distinguirse a sí mismos de lo foráneo; evitan así el ataque inmunitario devastador. Antes bien, el sistema inmunitario del perro va erosionando lentamente el tumor a lo largo de varios meses; células cancerosas pueden sobrevivir incluso después de la eliminación del tumor. A diferencia de los cánceres ordinarios, que perecen con su hospedador, éste perdura durante siglos.

DANIEL BOSCHUNG *zefa/Corbis*



4. TUMOR CEREBRAL (*azul*).

SIMON FRASER/RNC, NEWCASTLE UPON TYNE *Photo Researchers, Inc.*

Desde hace tiempo se viene objetando que el ratón constituya el modelo animal idóneo para el estudio del cáncer en humanos. Para algunos biólogos no es el modelo adecuado, habida cuenta de su diferente historia evolutiva. Los múridos heredaron de nuestro antepasado común el mismo juego de genes que nosotros hace unos 100 millones de años, pero desde entonces buena parte de esos genes ha experimentado numerosos cambios en uno y otro linaje. Los genes asociados con el cáncer, como el *FAS*, pueden haber sufrido un cambio evolutivo intenso en humanos en los dos o tres últimos millones de años, divergiendo del curso seguido por sus homólogos múridos.

Ni tal vez los ratones fueran modelos idóneos, si atendemos a su forma de reproducción. En el laboratorio, se han obtenido estirpes que se reproducen con mayor prontitud y engendran mayor prole que sus parientes silvestres. Tal manipulación puede haber perturbado la compensación evolutiva que han debido afrontar los múridos, pues se les recompensa por invertir más energía en un crecimiento rápido y en reproducirse a edad más temprana. Al propio tiempo, esta selección artificial puede estar operando en contra de las defensas frente al cáncer.

En última instancia, el estudio de la evolución del cáncer quizás arroje luz sobre las dificultades que acompañan a su erradicación. A la postre, el cáncer constituye una consecuencia fundamental del modo en que estamos hechos. Somos colonias celulares efímeras, creadas por nuestros genes para que los transmitamos a la generación siguiente. La solución definitiva del cáncer entraña cambios en nuestro modo de reproducción.

El autor

Carl Zimmer es autor de *Parasite Rex*.

Bibliografía complementaria

EVOLUTIONARY BIOLOGY OF CANCER. Bernard J. Crespi y Kyle Summers en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 20, págs. 545-552; 2005.

HUMAN PAPILLOMAVIRUS TYPE 16 AND 18 VARIANTS: RACE-RELATED DISTRIBUTION AND PERSISTENCE. L. F. Xi, N. B. Kiviat, A. Hildesheim, D. A. Galloway, C. M. Wheeler, J. Ho y L. A. Koutsky en *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 15, págs. 1045-1052; 2 de agosto, 2006.

CLONAL ORIGIN AND EVOLUTION OF A TRANSMISSIBLE CANCER. Claudio Murgia, Jonathan K. Pritchard, Su Yeon Kim, Ariberto Fassati y Robin A. Weiss en *Cell*, vol. 126, págs. 477-487; 11 de agosto, 2006.

AGEING: BALANCING REGENERATION AND CANCER. Christian M. Beausejour y Judith Campisi en *Nature*, vol. 433, págs. 404-405; 28 de septiembre, 2006.

POSITIVE SELECTION IN THE EVOLUTION OF CANCER. Bernard J. Crespi y Kyle J. Summers en *Biological Reviews*, vol. 81, págs. 407-424; 2006.

El pez cebra, versatilidad al servicio de la biomedicina

El pez cebra se ha convertido en un modelo inigualable para investigar diferentes procesos biológicos. Y ahora, sus cualidades genéticas y embrionarias se aprovechan para buscar nuevos medicamentos que permitan controlar enfermedades devastadoras, como el cáncer y el parkinson

Agustín Rojas-Muñoz, Antonio Bernad Miana y Juan Carlos Izpisúa Belmonte

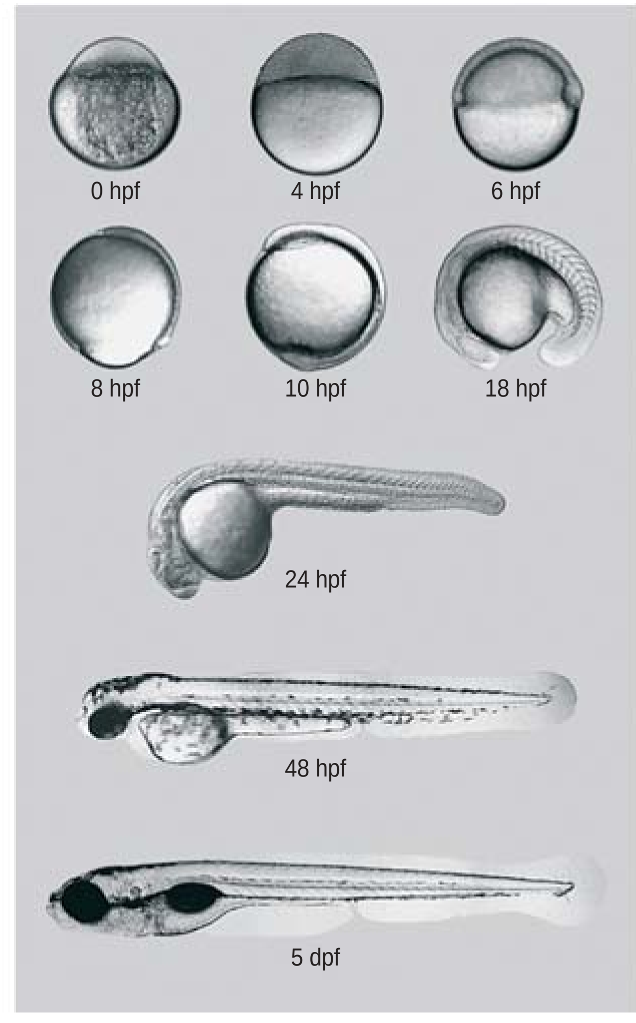
Muchas enfermedades son el resultado directo de errores en las instrucciones presentes en los genes. Generalmente, los genes ejercen su función biológica a través de las proteínas. Los genes y las proteínas están presentes en todos los seres vivos; son los arquitectos de la vida y los ladrillos para su construcción. La receta para preparar todos los tipos de proteínas está escrita en los genes. Errores en la información presente en estas recetas o plantillas se traducen en proteínas que funcionan anormalmente. Sin embargo, y a diferencia de un restaurante, las recetas en el cuerpo humano no se preparan a petición del comensal. El embrión, cuando se implanta, ya cuenta con un plan de desarrollo preestablecido acorde con la especie a la que pertenece. Este plan corporal consiste en un control temporal y espacial muy estricto, que determina la variedad de proteínas presentes en cada lugar y edad específicos del organismo. Los errores en este sistema de control también producen aberraciones en el funcionamiento de las proteínas. La mayoría de estos errores no son compatibles con la vida; en el mejor de los casos, generan alteraciones que pueden conducir a enfermedades devastadoras.

Conocer los agentes causantes de muchas de las enfermedades hereditarias ha significado por sí mismo un avance fundamental de la ciencia básica. Sin embargo, la búsqueda de una solución para esas patologías apenas ha comenzado. Actualmente, los seres humanos mueren de las mismas enfermedades genéticas que nuestros antepasados hace siglos. Sólo los cambios en el estilo de vida han modificado la esperanza de vida y la incidencia relativa de ese tipo de enfermedades. Tal situación explica que el cáncer y los trastornos cardíacos, por ejemplo, sigan sin un tratamiento eficaz. Urgen, pues, nuevos métodos y estrategias encaminados a estudiar los mecanismos celulares y moleculares subyacentes, así como intentar descubrir medicamentos y terapias efectivas contra estas y otras enfermedades. En los siguientes párrafos abordaremos algunos de estos aspectos y su relación con la biomedicina y la biotecnología en un futuro cercano. Un futuro que, sin duda, contará con un diminuto pez tropical denominado pez cebra.

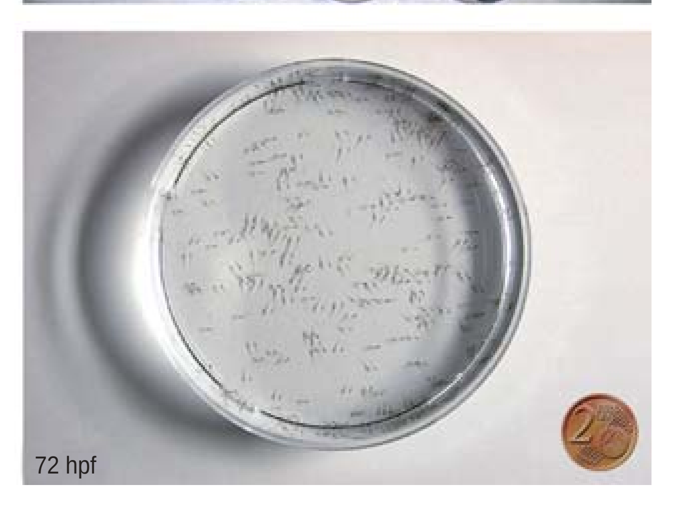
El pez cebra, modelo biológico

¿Qué tienen en común la mosca del vinagre, el ratón común, el pez cebra y los humanos? A primera vista muy poco. Sin embargo, años de investigación han puesto de manifiesto un sorprendente parecido en la mayoría de sus procesos biológicos fundamentales. Entre las semejanzas están









1. EL CICLO DE VIDA DEL PEZ CEBRA. La hembra deposita los huevos en el agua, donde los fecunda el macho. Las etapas del desarrollo embrionario se suceden rápidamente; se dan en horas pasada la fecundación (hpf) o días pasada la fecundación (dpf). Las hembras depositan más de 200 embriones por semana; los protege una membrana, el corion (*panel medio derecho*). Pasados tres días, los embriones eclosionan. Se los puede mantener en el laboratorio en cajas de cultivo gracias a su reducido tamaño (*panel inferior derecho*). A partir de los tres meses de vida pueden reproducirse de manera continua. Un adulto en edad de reproducción mide aproximadamente 4 centímetros. A diferencia del ser humano, el pez cebra continúa creciendo hasta la muerte.

A. ROJAS-MUÑOZ, A. BERNAD MIANA Y J. C. IZPISUA BELMONTE

el tipo de proteínas utilizadas para construir las diferentes partes del cuerpo, los mecanismos empleados para producir un organismo adulto, así como los procesos que marcan su envejecimiento y muerte. Por esta razón se puede asegurar que, en este contexto biológico, lo que es cierto para la mosca del vinagre lo es también para el ser humano. Ante tamaño grado de conservación biológica, determinados organismos lejanamente emparentados con el ser humano sirven como modelo para identificar agentes causantes de enfermedades hereditarias.

Entre los modelos biológicos más cercanos al ser humano se encuentra el pez tropical *Danio rerio*, o pez cebra. Durante mucho tiempo, no fue más que una mascota popular. Su uso en investigación básica se incrementó de manera sustancial hace un decenio, cuando se demostró que

podía ser utilizado en gran escala para identificar nuevos genes por medio de cribados mutacionales.

En los cribados mutacionales se inducen errores en la información contenida en los genes, alterando de esta manera la función de las proteínas que generan. Los genes dotados de una función específica se identifican por las malformaciones en la estructura o alteraciones en el proceso de interés que esos errores causan. Es como tratar de identificar la función de cada una de las piezas de un automóvil retirando al azar una cada vez para observar cómo afecta a su funcionamiento. Sin embargo, a diferencia de los coches y la mayoría de los vertebrados, los embriones del pez cebra son transparentes. Esta característica facilita la identificación del órgano afectado por la mutación.

La escala en que se han llevado a cabo cribados en el pez cebra es sorprendente. Mediante ese método se han encontrado en los últimos

2. EL PEZ CEBRA ES UNA HERRAMIENTA GENETICA. Al incubar machos en mutágenos, por ejemplo en ENU (etilnitrosourea), se altera la información presente en los genes —variante m—. Al cruzar estos machos con hembras de tipo salvaje (wt) —cruce parental, P—, podemos identificar malformaciones congénitas en una cuarta parte de las parejas estudiadas en la Filial 3 (F3). Algunas malformaciones saltan a la vista, como la reducción en el tamaño de los ojos en el panel de la derecha (m/m). Otras necesitan un examen más detallado. El panel inferior reúne una selección de malformaciones oculares identificadas por medio de cortes histológicos.

A. ROJAS-MUÑOZ, A. BERNAD MIANA Y J. C. IZPISUA BELMONTE

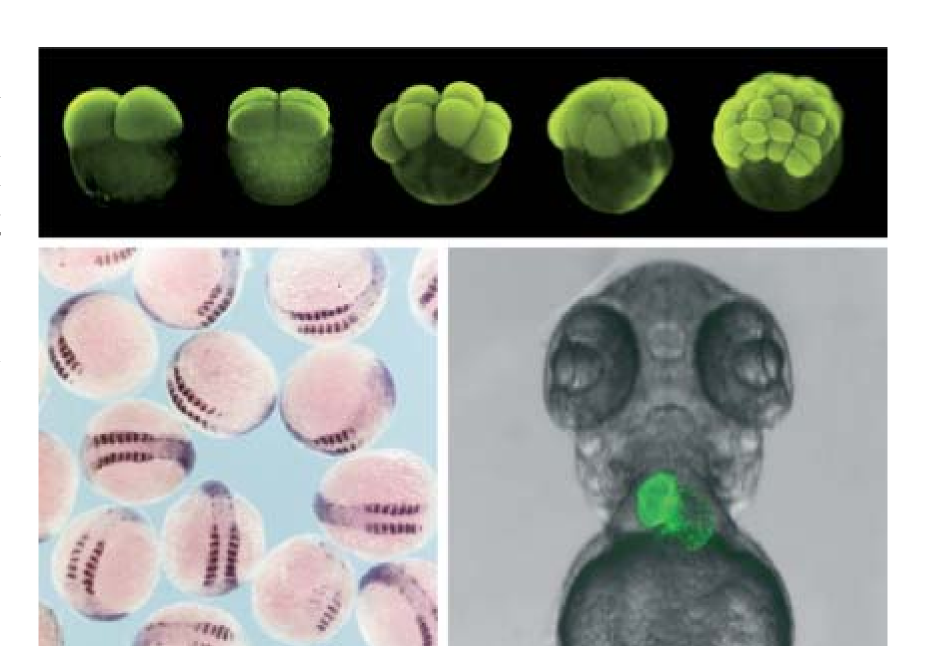
diez años más de mil mutaciones que afectan al desarrollo de órganos, a su funcionamiento o a lo uno y lo otro. Eso sí, hay que tener en cuenta que, aun cuando los cribados han generado amplia información acerca de la función temprana de alrededor de 400 genes, no se ha establecido todavía la relación de la mayoría de éstos con enfermedades específicas.

Otras características explican el éxito del pez cebra como modelo biológico para estudiar el desarrollo temprano en vertebrados. Por ejemplo, tiene un tiempo aproximado de generación de tres meses y los adultos se mantienen fértiles durante más de doce. Esto significa que se puede tener un suministro constante de embriones a un costo relativamente bajo, comparado con otros vertebrados.

Además, la fecundación de los huevos y la totalidad del desarrollo se llevan a cabo fuera de la hembra, condición que facilita el estudio directo de las etapas tempranas de la ontogenia. Añádase que suelen obtenerse de 200 a 500 embriones por pareja a la semana. Las ventajas que estas características innatas ofrecen para la investigación básica se ven favorecidas por el creciente número de técnicas que se han desarrollado alrededor de este modelo biológico.

La caja de herramientas del pez cebra

Los estudios pioneros de George Streisinger con *Danio rerio* a finales de los años setenta sentaron las bases para su posterior uso como modelo biológico. Tanto el pez cebra como el ser humano son organismos diploides. Es decir, tienen por duplicado las recetas necesarias para mantener el flujo constante de la información biológica de una generación a otra. Una copia es aportada por la madre y otra por el padre. En el pez cebra, los embriones con una sola copia cromosómica (haploides) pueden desarrollarse de manera normal sólo hasta las 72 hpf (horas post-fecundación). Streisinger desarrolló métodos para generar embriones haploides o diploides de origen exclusivamente materno. De ese modo identificó los primeros mutantes de esta especie. Tales avances metodológicos, junto con el corto período entre generaciones, la gran cantidad de embriones obtenidos por pareja semanalmente, el reducido tamaño de los adultos y su desarrollo externo redujeron las restricciones que hasta ese momento impedían la mutagénesis a gran escala en vertebrados.



3. EL PEZ CEBRA ES UN MODELO UNICO para estudiar diferentes aspectos de la biología de los vertebrados. Debido a su éxito como herramienta genética, se ha creado una extensa gama de técnicas alrededor de este animal. Su desarrollo externo y la transparencia del embrión permiten la investigación pormenorizada de las primeras fases del desarrollo de los vertebrados; por ejemplo, la distribución de proteínas depositadas por la hembra en el huevo. Una de estas proteínas se visualiza en color verde en el panel superior, desde la fase de dos células hasta la fase de 64 células. De forma similar, se puede analizar la distribución temporal y espacial de diferentes ARN mensajeros por medio de la hibridación *in situ*. Por ejemplo, el panel inferior izquierdo muestra el lugar y momento precisos en que se requiere la actuación de un gen necesario para que se desarrollen los músculos del tronco. Recientemente, se ha logrado integrar material genético en el genoma del pez cebra. Gracias a este procedimiento, denominado transgénesis, se han visualizado células y órganos en tiempo real mediante la proteína fluorescente GFP; es el caso del corazón del panel inferior derecho (a las 60 horas de la fecundación). Esta técnica promete revolucionar el estudio de los procesos biológicos.

A. ROJAS-MUÑOZ, A. BERNAD MIANA Y J. C. IZPISUA BELMONTE

La investigación viene aplicando una amplia diversidad de metodologías que permiten la manipulación de la función génica en el pez cebra con una excelente resolución espacial y temporal. Por ejemplo, la transparencia del embrión ha permitido el desarrollo de técnicas no invasoras de observación basadas en proteínas fluorescentes como la proteína fluorescente verde (GFP, de Green Fluorescent Protein). Tales macromoléculas emiten un haz de luz que permite percibir los más íntimos detalles de las células que las portan, en vivo y en directo. Viene a ser como la diferencia entre seguir una competición deportiva por televisión o tratar de reconstruir lo sucedido en ella a partir de un reducido grupo de fotografías. Esta ventaja constituye una revolución técnica sólo disponible en el pez cebra.

La transparencia del embrión ha permitido identificar la dinámica de expresión de genes diana *in vivo*

IMPACTO DEL PEZ CEBRA EN BIOMEDICINA Y BIOTECNOLOGIA		
CAMPO DE APLICACION	**EJEMPLO**	**COMENTARIO/DIANA**
Desarrollo de nuevos fármacos		
Descubrimiento	Control de arritmia severa Regulación de señalización Cáncer	Ortólogo de HERG Proteínas G heterotriméricas Genérico
Mecanismo de acción	Angiogénesis Fenotipos tempranos inducidos por fármacos	Metioninaaminopeptidasa (MetAP-2) Proteínas ribosómicas
Metabolismo y excreción	Metabolismo de moléculas pequeñas	
Farmacodinámica y farmacocinética	Rutas de absorción	Genérico
Mutágeno	Efectos sobre la integridad del genoma	Genérico
Modelos de enfermedad		
Cáncer	Leucemia Metástasis Genética y cribado	c-myc
Trastornos del sistema inmunitario	Genérico/Básico Trasplante	
Cardiovascular	Mutante Gridlock Insuficiencia circulatoria	*Hey*2 Syndecan-2
Trastornos del comportamiento	Alteraciones del sueño y drogodependencias	Receptores de opiáceos
Enfermedades raras	Síndrome de DiGeorge Anemia de Fanconi Atrofia muscular espinal	Mutación Van Gogh (tbx1) FANCD2 Smn
Enfermedades infecciosas	Patogénesis estreptocócica	Genérico
Factores ambientales	Efecto de la dieta en la patología neurológica Flora bacteriana del intestino y patología Osteoporosis	Piruvato deshidrogenasa Regulación de la expresión génica en el intestino Microgravedad
Toxigenómica		
Contaminación ambiental	Evaluación de la calidad del agua Compuestos orgánicos Metilmercurio Cadmio	Genérico Genérico Genérico HSp70
Piscicultura		
Estudio de patogénesis	Infecciones bacterianas y víricas	Estreptococo y Salmonela
Desarrollo de vacunas	Vacunas antivíricas	Virus con cápside
Mejora	Efectos secundarios poblacionales	Hormona de crecimiento en salmón
Biorreactores	Producción de proteínas de interés biomédico	FVII Genérico

por medio de la transgénesis. Por transgénesis se entiende la capacidad de introducir genes y sus regiones reguladoras dentro del genoma. Este procedimiento nos faculta para controlar la función génica y observar el momento y lugar en que se activan los genes diana. No sólo se pueden identificar grupos de células por medio de la transgénesis, sino también órganos e incluso procesos fisiológicos, como la digestión de grasas o la actividad neuronal. Con esa técnica se aceleró el advenimiento de una segunda generación de cribados mutacionales encaminados a estudiar la función celular en el contexto del organismo.

Por otra parte, la microinyección de ARNm o ADN permite la síntesis masiva o regulada de proteínas. El ADN, ácido nucleico del que están compuestos los genes, se transcribe en ARNm, copia que sólo se produce

cuando lo requiere la célula. Cuando se inyecta ARNm al comienzo del desarrollo embrionario, todas las células del embrión fabricarán la proteína correspondiente. De manera opuesta, el desarrollo de moléculas capaces de reducir los niveles normales de producción de proteínas (por ejemplo, los morfolinos), ha permitido la evaluación rápida de la función de genes diana. Los morfolinos se unen al ARNm y evitan que dirija la síntesis de proteínas.

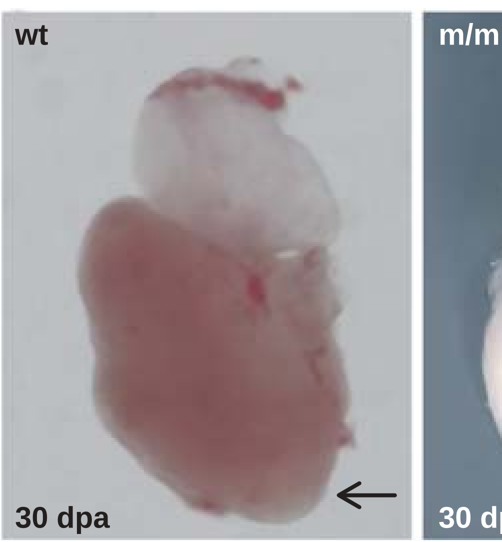
Asimismo, es posible generar mosaicos genéticos por medio del trasplante de blastómeros (células embrionarias) de un organismo a otro. A través de la aplicación de este procedimiento se han evaluado *in vivo* los efectos celulares de las manipulaciones genéticas ya descritas. La identificación de promotores endógenos —regiones específicas de los genes que indican el momento y lugar en que la célula requiere la información que esos mismos genes contienen— a los que se pueda regular a voluntad constituyó la llave para manipular la actividad génica con gran resolución temporal. Merced a ese puñado de avances metodológicos, el pez cebra se ha convertido en el segundo modelo biológico de mayor relevancia entre los vertebrados, después del ratón.

Además de las herramientas diseñadas para manipular la función genética, la comunidad científica que trabaja con el pez cebra está generando un grupo de herramientas virtuales esenciales para entender la función de los genes y las proteínas. Entre estas herramientas se cuenta la secuencia de su genoma, vale decir, la identificación de cada una de las palabras y signos de puntuación presentes en cada una de las recetas necesarias para construirlo. Y se han establecido patrones de expresión genética global, así como bases de datos que pueden ser escrutadas libremente a través de Internet.

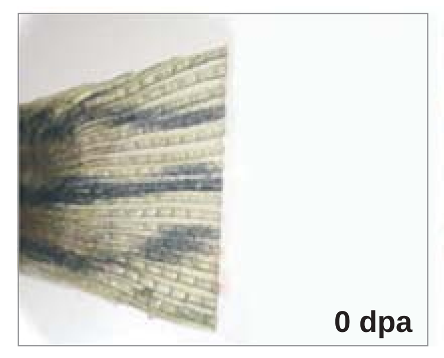
El pez cebra, modelo biomédico y biotecnológico

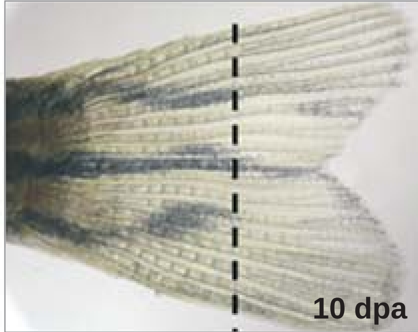
Las mismas características que han hecho del pez cebra una herramienta de gran valor para estudiar la biología del desarrollo, se aprovechan ahora para el descubrimiento de nuevos medicamentos. En particular, el costo











A. ROJAS-MUÑOZ, A. BERNAD MIANA Y J. C. IZPISUA BELMONTE

4. A DIFERENCIA DE LA MAYORIA DE LOS VERTEBRADOS, el pez cebra está capacitado para regenerar diferentes estructuras de su anatomía. Con una rápida e indolora incisión desde el vientre adulto cabe eliminar parte del corazón sin afectar la viabilidad. A los pocos días, un individuo normal (wt) recupera la forma y función de su corazón (*panel medio izquierdo*), mientras que un individuo con malformaciones genéticas específicas (m/m) produce una cicatriz que inhibe la regeneración (*panel medio derecho*). El corazón humano cicatriza en respuesta a un trauma y es incapaz de reemplazar el tejido cardíaco afectado. La cola del pez cebra crece luego de ser amputada. Esta estructura es de fácil acceso en el adulto y su estudio ha permitido la identificación de varios genes necesarios para regenerar órganos en vertebrados. En cada panel se indican los días transcurridos después de la amputación (dpa).

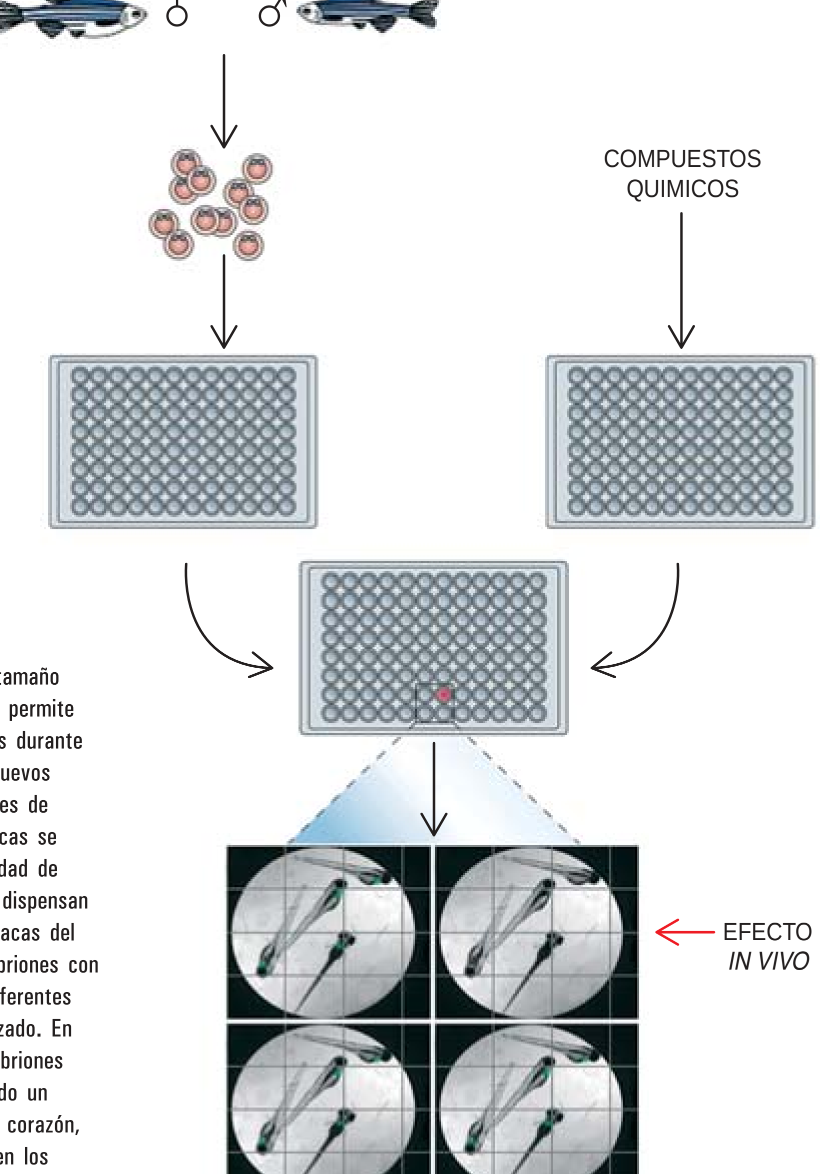
de mantener el pez cebra es entre 100 y 1000 veces menor que el de mantener ratones de laboratorio. Sin embargo, el mayor ahorro, desde el punto de vista biomédico, es el de compuestos químicos. Como varias larvas pueden vivir en un volumen de líquido del tamaño de una gota de agua, sólo se necesitan cantidades mínimas de los compuestos por ensayo. Una ventaja única para identificar *in vivo* compuestos dotados de actividad biológica en fases tempranas del desarrollo.

No hace mucho, diversos grupos recurrieron al pez cebra para establecer modelos biomédicos de enfermedades humanas: la distrofia muscular, la degeneración del músculo cardíaco, la fibrosis quística, diferentes tipos de cáncer, la anemia, el procesamiento de colesterol y enfermedades del sistema inmune. Estos modelos, acoplados con la posibilidad de evaluar el efecto de numerosos compuestos químicos con potencial terapéutico, han marcado el nacimiento de una nueva etapa en biomedicina. Una etapa que sustenta su éxito en la investigación básica. El límite parece hallarse sólo en la imaginación de la comunidad científica y su capacidad de generar nuevos modelos en el pez cebra que semejen enfermedades humanas. Importa mencionar que no cabe pensar en una aproximación similar con roedores, cuyo desarrollo ocurre *in utero* y aportan una cifra limitada de embriones. Por su parte, los resultados obtenidos de cultivos celulares se resienten de la falta de contexto, tanto en lo que se refiere al tipo de tejido como a la fase del desarrollo.

El pez cebra también ha comenzado a ganar terreno en biotecnología. En ese dominio, se han diseñado algunas variantes que emiten luz en la oscuridad y pueden usarse como biosensores, ya que emiten luz únicamente cuando se encuentran en un medio muy contaminado por metales pesados y otros desechos industriales. Varios problemas de salud en humanos, entre ellos la esterilidad y el cáncer, guardan relación con la exposición a este tipo de compuestos. Habida cuenta de la preocupación por los efectos de la contaminación del medio y sus consecuencias en el ser humano, cabe pensar que el número y diversidad de biosensores generados a partir del pez cebra se multiplicarán en los próximos años. Por otra parte, adultos o embriones utilizados como biorreactores podrían ofrecer a la industria una nueva forma de producir a gran escala proteínas que requieran una maduración compleja.

Conclusiones

El pez cebra se utilizó inicialmente como una herramienta para estudiar el desarrollo de los órganos en vertebrados. Después, su abanico de ventajas experimentales lo han convertido en una herramienta biomédica y biotecnológica de gran valor añadido. En ambos casos, el alto grado de semejanza genética y fisiológica



5. INVESTIGACION A GRAN ESCALA. El reducido tamaño de la numerosa progenie del pez cebra no sólo nos permite analizar el efecto de múltiples compuestos químicos durante el desarrollo embrionario, sino identificar también nuevos medicamentos. Los embriones provenientes de padres de tipo salvaje o portadores de malformaciones genéticas se distribuyen en placas de 96 pocillos con una densidad de hasta cuatro embriones por pocillo. Igualmente, se dispensan diluciones de diferentes compuestos químicos en placas del mismo formato. Posteriormente, se incuban los embriones con los compuestos químicos. Su efecto se evalúa a diferentes tiempos por medio de un sistema óptico computarizado. En el ejemplo de la figura, el corazón de todos los embriones expresa la proteína fluorescente verde (GFP). Cuando un compuesto afecta específicamente el desarrollo del corazón, no se puede detectar la señal emitida por la GFP en los embriones del pocillo correspondiente (*panel superior derecho*).

A. ROJAS-MUÑOZ, A. BERNAD MIANA Y J. C. IZPISUA BELMONTE

con el ser humano han sido de vital importancia.

Con todo, la llave de su éxito quizá se deba a la posibilidad de realizar experimentos a gran escala, ya que permite generar plataformas encaminadas al análisis sistemático de compuestos químicos con potencial terapéutico. Por este camino se han identificado nuevos genes y compuestos químicos que regulan la proliferación descontrolada de células, una esperanza de tratamiento para las personas con cáncer. Asimismo, se buscan nuevos blancos terapéuticos por medio del uso sistemático de morfolinos y cribados genéticos.

Los autores

Juan Carlos Izpisúa Belmonte es profesor del Laboratorio de Expresión Génica y director del Centro de Células Madre del Instituto Salk en La Jolla, labor que comparte con la dirección del Centro de Medicina Regenerativa de Barcelona. **Agustín Rojas-Muñoz** ocupa el cargo de investigador asociado en el grupo de Izpisúa-Belmonte en el Instituto Salk de San Diego. **Antonio Bernad Miana** es profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, con destino en el departamento de inmunología y oncología del Centro Nacional de Biotecnología de Madrid. Los autores centran sus investigaciones en la regeneración de órganos y tejidos, para lo que utilizan el pez cebra como herramienta biológica.

Bibliografía complementaria

GENETIC APPROACHES TO DISEASE AND REGENERATION. M. T. Keating en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 359, págs. 795-8; 2004.

TECHNOLOGY FOR HIGH-THROUGHPUT SCREENS: THE PRESENT AND FUTURE USING ZEBRAFISH. D. R. Love, F. B. Pichler, A. Dodd, B. R. Coppy D. R. Greenwood en *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 15, págs. 564-71; 2004.

IN VIVO DRUG DISCOVERY IN THE ZEBRAFISH. L. I. Zon y R. T. Peterson en *Nature Review Drug Discovery*, vol. 4, págs. 35-44; 2005.

TRANSGENES AS SCREENING TOOLS TO PROBE AND MANIPULATE THE ZEBRAFISH GENOME. A. Amsterdam y T. S. Becker en *Developmental Dynamics*, vol. 234. págs. 255-68; 2005.



La comprensión de los procesos químicos por los que operan la aspirina y el Vioxx puede conducir a analgésicos con efectos secundarios más leves

Mejora de los

Gary Stix

Bengt Samuelsson ganó el premio Nobel de fisiología y medicina en 1982 por el descubrimiento del mecanismo de síntesis de las prostaglandinas. Estas sustancias, semejantes a hormonas, participan en la regulación de diversos procesos biológicos (la inducción de dolor, la fiebre y la inflamación, entre otros), bloqueados por la aspirina, el ibuprofeno y otros fármacos afines. Samuelsson llevó a cabo su investigación, junto con Sune Bergström, otro de los premiados aquel año, en el Instituto Karolinska de Estocolmo, la institución que concede el premio Nobel en medicina.

La relación del Karolinska con las prostaglandinas viene de lejos. Se remonta al descubrimiento de estos derivados de los ácidos grasos en 1935. En los últimos años, Samuelsson y sus colaboradores han proseguido el estudio de la bioquímica de las prostaglandinas. Los resultados de esa investigación se aplican ahora al desarrollo de analgésicos y antiinflamatorios más seguros, entre ellos los inhibidores de la COX-2, tan controvertidos. Samuelsson señala la enorme demanda de antiinflamatorios; subraya también la importancia de conseguir un fármaco tan eficaz como los anteriores y con menos efectos secundarios.



El árbol y las ramas

El comunicado oficial del galardón le atribuía a Samuelsson el mérito de desentrañar “el árbol de la prostaglandina con todas sus ramas”. Samuelsson había demostrado que las prostaglandinas se fabrican cuando el ácido araquidónico de la membrana celular es procesado por enzimas a través de una serie de etapas. Resultan compuestos que desempeñan toda una gama de funciones reguladoras internas: asegurar que los riñones reciban un flujo sanguíneo suficiente, controlar la contracción del útero durante el parto y la menstruación o provocar una inflamación (señalada por enrojecimiento e hinchazón) como respuesta protectora ante infecciones y heridas.

La aspirina y otros antiinflamatorios no esteroideos, como el ibuprofeno, operan mediante el bloqueo de la acción de dos enzimas que actúan en la primera fase de la síntesis de la prostaglandina: las ciclooxigenasas 1 y 2 (COX-1 y COX-2). La inhibición de estas enzimas COX detiene la síntesis de la serie de prostaglandinas.

Pero con una interrupción tan radical, la aspirina y sus parientes causan problemas. Cuando la aspirina atenúa la producción de la prostaglandina responsable de la inflamación, ejerce el mismo efecto sobre uno o más de los derivados del ácido araquidónico que protegen las paredes del estómago del ácido clorhídrico presente en los jugos gástricos. Las compañías farmacéuticas hallaron una primera solución a ese problema en los años noventa con el desarrollo de Vioxx, Celebrex y otros fármacos que bloquean la COX-2 de forma específica y, por ende, dejan intactas algunas de las prostaglandinas protectoras del estómago que se producen en respuesta a la actividad de la COX-1.

Con todo, pronto se notaron los inconvenientes de esa estrategia. Parece que el bloqueo de la COX-2 trastorna una serie de interacciones complejas entre las prostaglandinas. Por un lado, disminuye la producción de prostaglandina E_2 (PGE_2), que desarrolla una función esencial en la inducción del dolor y la inflamación; pero, por otro, reduce la síntesis de la prostaciclina (PGI_2), una sustancia protectora del corazón que dilata los vasos sanguíneos y evita la agregación plaquetaria. Y esa disminución puede tener consecuencias peligrosas.

En 1999, Garrett A. FitzGerald, del hospital de la Universidad de Pennsylvania, publicó un artículo

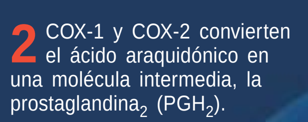
DAVE CUTLER

PERFECCIONAMIENTO DE LA ASPIRINA Y OTROS ANALGESICOS

Las células involucradas en la inflamación sintetizan prostaglandina E_2 (PGE_2) (*etapas 1 a 3 del diagrama*) en cuantía abundante. El proceso causa dolor, inflamación y fiebre. La aspirina, el Vioxx y otros analgésicos operan mediante la inhibición de enzimas que catalizan la síntesis de la prostaglandina (*los dos recuadros superiores*). Pero hay prostaglandinas y sustancias producidas por las enzimas que resultan beneficiosas; el bloqueo de su síntesis ejerce efectos secundarios. De ahí que se hallen en estudio agentes como los inhibidores de la mPGES-1, que bloquean sólo la síntesis de cantidades excesivas de PGE_2, lo que permite la generación de las sustancias beneficiosas (*recuadro inferior*).

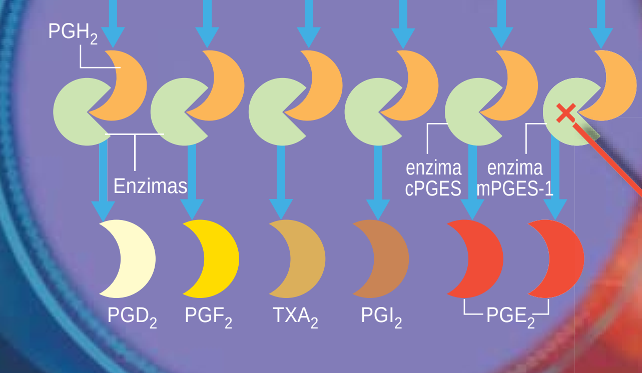
1 La mayoría de las células producen prostaglandinas a través de reacciones iniciadas por la acción de la enzima COX-1 sobre un ácido araquidónico. Cuando sufre daño un tejido, una señal química ordena a los macrófagos y a otras células inflamatorias próximas a la lesión que intensifiquen la actividad de la enzima COX-2, que opera también sobre el ácido araquidónico.

2 COX-1 y COX-2 convierten el ácido araquidónico en una molécula intermedia, la $prostaglandina_2$ (PGH_2).



3 Unas enzimas adicionales convierten luego la PGH_2 en otras prostaglandinas y en tromboxano, cada una de ellas con una función distinta (*abajo*). En último término, todas las prostaglandinas, incluso las PGE_2 causantes del dolor, se liberan para actuar sobre otras células.





LAS PROSTAGLANDINAS Y SUS EFECTOS DIVERSOS

Prostaglandina D_2 (PGD_2)
Participa en la regulación del sueño y las reacciones alérgicas

Prostaglandina F_2 (PGF_2)
Controla la contracción del útero durante el parto y la menstruación

Tromboxano A_2 (TXA_2)
Estimula la vasoconstricción e induce la agregación plaquetaria (trombosis)

Prostaciclina (PGI_2)
Dilata los vasos sanguíneos e inhibe la agregación plaquetaria (trombosis). Puede proteger contra la aterosclerosis y lesiones de las paredes del estómago

Prostaglandina E_2 (PGE_2)
Participa en el dolor, la inflamación y la fiebre; protege contra lesiones del estómago

ACTUACION DE LA ASPIRINA

La aspirina y otros antiinflamatorios no esteroideos bloquean las enzimas COX-1 y COX-2, con la consiguiente inhibición de la síntesis de prostaglandinas, beneficiosas o dañinas.

ACTUACION DE LOS INHIBIDORES DE COX-2

La COX-2 causa dolor e inflamación al elevar los niveles de PGE_2 a través de una ruta en la que interviene la enzima mPGES-1. Mediante el bloqueo de COX-2, Vioxx, Celebrex, Bextra y otros inhibidores detienen el aumento de la PGE_2. Esas sustancias presentan sólo un ligero riesgo de daño del estómago, seguramente porque se mantiene la producción de COX-2 en niveles normales bajo la dirección de COX-1 y de la enzima cPGES. Sin embargo, los inhibidores de COX-2 rebajan también la concentración de PGI_2, que ejerce un efecto protector sobre el sistema vascular. El descenso de PGI_2 puede explicar la mayor incidencia de ataques cardíacos y apoplejías entre quienes toman esos fármacos.

ACTUACION DE LOS INHIBIDORES DE mPGES-1

Estos agentes, todavía en desarrollo, bloquean específicamente la mPGES-1, que se produce en grandes cantidades por mandato de COX-2 en las células que responden a una agresión inflamatoria. Mediante la reducción de la mPGES-1, mas no de las enzimas que producen niveles de prostaglandina normales, quizá se controlen los niveles de PGE_2 y se alivie el dolor sin perjudicar el corazón ni el sistema digestivo.

DANIELA NAOMI MOLNAR



en los *Proceedings of the National Academy of Sciences* sobre un ensayo clínico a pequeña escala que demostraba la inhibición de la PGI_2. Descubrió que, cuando la PGI_2 disminuía por haber ingerido un inhibidor de la COX-2, el tromboxano, se mantenía operativa otra prostaglandina que se produce en la ruta del ácido araquidónico: cumplía funciones vasoconstrictoras y de agregación plaquetaria a las que en condiciones normales se opone la PGI_2.

Ese desequilibrio alentaría la formación de coágulos (trombosis), que provocarían ataques cardíacos y apoplejías. Tal conclusión se ha esgrimido en los últimos años en demandas presentadas contra los fabricantes de inhibidores de la COX-2. FitzGerald comenzó a difundir sus hallazgos en conferencias impartidas en 1997, un año antes de aprobarse el primer inhibidor de COX-2, el Celebrex.

Mientras el grupo de FitzGerald lanzaba señales de aviso de peligros venideros, el equipo que dirige Samuelsson se dedicaba a insertar una nueva hoja en una rama del árbol de la prostaglandina. Per-Johan Jakobsson, posdoctorando del laboratorio, descubrió la versión humana de una enzima productora de PGE_2. En una publicación conjunta de Jakobsson, Samuelsson y dos colaboradores en 1999, la enzima se presentaba como una potencial y novedosa diana del desarrollo de fármacos.

Biolipox, pequeña compañía creada en 2000 por dos científicos del Karolinska, tomó nota de ambas publicaciones. Se proponía desarrollar fármacos antiinflamatorios para enfermedades respiratorias mediante la manipulación de una clase recién descubierta de biomoléculas, las eoxinas, que se generan también a partir del ácido araquidónico. Un año más tarde, Biolipox decidió diversificarse. Adquirió de Karolinska la propiedad intelectual de la enzima sintetasa de prostaglandina E microsomal (mPGES-1). Un fármaco que bloqueara de forma selectiva la enzima productora de la PGE_2 podría mitigar el dolor y la inflamación sin efectos adversos gastrointestinales ni cardiovasculares, ya que no disminuiría los niveles de PGI_2. Quizás abriría las puertas a los antiinflamatorios no esteroideos de tercera generación.

Liberación de inhibidores

Biolipox se ubica hoy en el mismo edificio que aloja la biblioteca de ciencias y los departamentos de bioinformática y didáctica en el campus del Karolinska. Samuelsson es miembro de la junta directiva y asesor científico de la compañía. Boehringer Ingelheim, fabricante del Mobic, inhibidor de la COX-2, firmó en 2005 un acuerdo con Biolipox para financiar la investigación sobre mPGES-1 y autorizar luego el desarrollo final y comercialización de los inhibidores.

El enorme mercado de analgésicos no narcóticos en EE.UU. (superior a diez mil millones de dólares anuales), unido al fracaso de los inhibidores de COX-2, ha hecho que otras compañías fijen también su atención en la referida enzima. Merck ha publicado un estudio sobre los inhibidores de la mPGES-1. Pfizer ha registrado la patente de un ratón en el que se ha eliminado el gen de mPGES-1 con el fin de estudiar los efectos del bloqueo de la enzima. También otras empresas farmacéuticas han registrado patentes relacionadas con la mPGES-1. “Las placas tectónicas se mueven”, advierte FitzGerald. “El mercado actual es inmenso, pero hay una gran inseguridad en cuanto al repertorio de fármacos existentes.” Añade que una compañía proyecta acometer pruebas clínicas con un inhibidor de mPGES-1. (Por su parte, otros laboratorios farmacéuticos se proponen desarrollar medicinas que se unirían a los receptores de PGE_2 y bloquearían directamente su funcionamiento.)

Las pruebas de Vioxx tal vez frenen la irrupción en el mercado de cualquier nuevo antiinflamatorio. De hecho, ya han aparecido los pesimistas. En un artículo que publicó *Trends in Pharmacological Sciences* en 2006 con el título “¿Es la mPGES-1 un objetivo prometedor de la terapia analgésica?” se cuestiona que el complejo mecanismo de la prostaglandina ofrezca buenas perspectivas para un fármaco nuevo. Como allí se señala, prescindir de la mPGES-1 puede hacer que se produzca menos PGE_2 y mayor cantidad de otra prostaglandina cuyas consecuencias fisiológicas se desconocen. Por si fuera poco, no sólo la PGE_2, sino la mayoría de las demás prostaglandinas intervienen en la generación del dolor.

Sólo las pruebas clínicas acerca de la seguridad y eficacia en humanos resolverán las disputas. Los primeros estudios con ratones transgénicos a los que se ha silenciado *mPGES-1* ofrecen resultados alentadores. Según un informe del grupo de FitzGerald de 2006, la desactivación de mPGES-1 elevaba los niveles de PGI_2, inocua para el corazón, mientras el perjudicial tromboxano se mantenía estable. Al propio tiempo, la coagulación y la presión sanguínea permanecían normales. Un estudio posterior del equipo de FitzGerald demostró que la inactivación de mPGES-1 comportaba algún beneficio cardiovascular, tal vez por la elevada tasa de PGI_2.

Prosigue la búsqueda de compuestos que repitan los efectos de la desactivación de *mPGES-1*. Y se han iniciado preparativos para acometer la etapa siguiente: pasar de ratones a humanos.

Bibliografía complementaria

IDENTIFICATION OF HUMAN PROSTAGLANDIN E SYNTHASE: A MICROSOMAL, GLUTATHIONE-DEPENDENT, INDUCIBLE ENZYME, CONSTITUTING A POTENTIAL NOVEL DRUG TARGET. Per-Johan Jakobsson, Staffan Thorén, Ralf Morgenstern y Bengt Samuelsson en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 96, n.º 13, págs 7220-7225; 22 de junio de 1999.

IS MPGES-1 A PROMISING TARGET FOR PAIN THERAPY? Klaus Scholich y Gerd Geisslinger en *Trends for Pharmacological Sciences*, vol. 27, n.º 8, págs. 399-401; agosto de 2006.

DELETION OF MICROSOMAL PROSTAGLANDIN E SYNTHASE-1 AUGMENTS PROSTACYCLIN AND RETARDS ATHEROGENESIS. Miao Wang, Alicia M. Zukas, Yiqun Hui, Emanuel Ricciotti, Ellen Puré y Garrett A. FitzGerald en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 103, n.º 39, págs. 14507-14512; 26 de septiembre de 2006.

Los sonidos del espaciotiempo

Cuando dos agujeros negros se funden, generan ondas gravitatorias con patrones característicos del fenómeno. ¿Pueden oírse?

Craig J. Hogan

De los hábitos compartidos por antiguos y modernos, quizá no lo haya más sereno que observar las estrellas. Cuando contemplamos un firmamento rutilante o las hermosísimas fotografías de estrellas y galaxias del Telescopio Espacial Hubble, penetramos en un reino mágico de sagrada calma, como una catedral antigua o un museo de prestigio.

¿Cómo se sentiría si mientras admira en silencio el cielo, oyera de repente un rumor de estrellas?

Pasada la conmoción de que le hubiesen arrancado de su ensueño poético, el universo le parecería quizá mucho más inmediato, presente, verdadero y vivo. Una cosa es ver destellos y relámpagos a distancia, y otra muy distinta que nos sacuda el sonido arrollador del trueno. Oír el universo es, en cierto modo, tocarlo. Se están descubriendo formas de "palpar" el activo universo que nos rodea.

La teoría einsteiniana del espaciotiempo nos enseña que el universo no es silencioso. El espacio y el tiempo albergan una cacofonía de vibraciones con texturas y timbres tan ricos y variados como la música de una selva tropical o el final de una ópera de Wagner. Pero aún no hemos oído esos sonidos. El universo es un concierto al que hemos estado asistiendo como si se tratase de una película muda.

Vibraciones del espaciotiempo

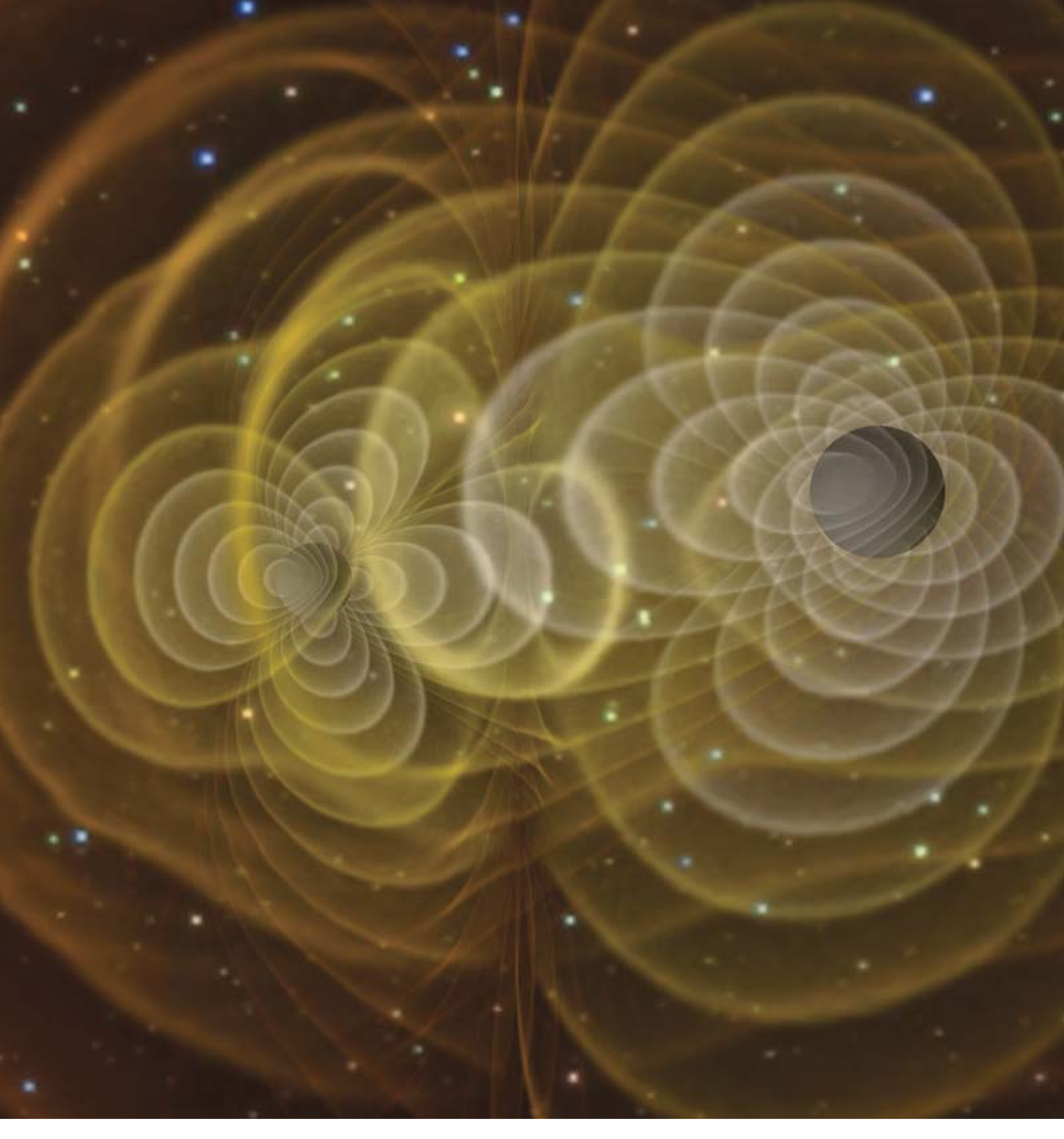
Los sonidos del cosmos no son como los que captan nuestros oídos, transportados por las vibraciones del aire. El espacio es un vacío casi perfecto. El sonido ordinario sólo puede darse donde haya materia que pueda vibrar. Nuestro conocimiento inmediato del universo lejos del sistema solar, desde la astronomía precientífica hasta ahora, nos viene casi enteramente de una sola forma de energía: la luz. Según demostró James Clerk Maxwell en el siglo XIX, la luz no es sino otro nombre de las vibraciones de los campos eléctricos y magnéticos que viajan a través del espacio a la velocidad de la luz.

(Para ser justos, no debemos olvidarnos aquí de otros mensajeros de lo lejano: rayos cósmicos, neutrinos, polvo cósmico, meteoritos y otra materia que cae a la Tierra desde el espacio exterior. Sobre todo, no debemos olvidarnos del origen cósmico de todos los átomos que componen la Tierra, incluidos los que nos constituyen. Pero son cuestiones distintas.)

En contraste con las vibraciones de los campos eléctricos y magnéticos que llamamos luz, los sonidos del universo son transportados por vibraciones del espaciotiempo, las *ondas gravitatorias*. La teoría general de la relatividad de Albert Einstein nos dice que todas las formas de materia crean deformaciones en el espaciotiempo y que los movimientos de la materia generan vibraciones que viajan por el espacio a la velocidad de la luz. Las vibraciones estiran y encogen la urdimbre del propio espacio. Las más rápidas aceleraciones de los objetos más densos y de gravedad más intensa, los agujeros negros (que consisten en realidad en densos nudos de la curvatura del espaciotiempo), crean las vibraciones más sonoras. Cuando podamos oírlas, percibiremos cataclismos enormes, y a menudo invisibles, del universo observable.

Las ondas gravitatorias se emiten cuando se aceleran grandes masas; la luz, cuando se aceleran pequeñas cargas eléctricas. De ahí que las ondas gravitatorias tengan frecuencias mucho menores que la luz. Los sucesos en que se producen aquéllas y éstas difieren. Las estrellas normales emiten mucha luz a causa del movimiento de los electrones en su atmósfera caliente, pero apenas generan radiación gravitatoria. En el extremo opuesto, las más potentes transformaciones energéticas del universo —la fusión de dos agujeros negros entre sí para generar un agujero negro mayor— emiten casi toda su energía en

CORTESIA DE CHRISTOPHER HENZE, *NASA/American Scientist*



1. A PESAR DE LA SERENA IMPRESION QUE CAUSA, el cosmos es un maremágnum plagado de cataclismos, de episodios que no nos son visibles pese a las poderosas masas que intervienen. Acontece con la fusión de dos agujeros negros, la mayor transformación de energía del universo, representada aquí en una simulación de la NASA. Cuando dos agujeros negros, las más densas concentraciones de masa, se precipitan en espiral el uno sobre el otro y chocan para formar un nuevo agujero negro supermasivo, emiten cantidades enormes de energía en forma de ondas gravitatorias, vibraciones que estiran y encogen el espaciotiempo. Si los oídos humanos percibieran tan profundas vibraciones, el espacio parecería un lugar retumbante, cacofónico. Una primera generación de detectores terrestres está ahora escuchando las ondas gravitatorias; para detectar episodios de mayor alcance en regiones más lejanas en el espacio y el tiempo, se están proyectando nuevos ingenios espaciales.

forma de ondas gravitatorias y apenas algo de ella en forma de luz.

En el escaso tiempo que tarda en producirse la fusión, alrededor de una hora en el caso de los mayores agujeros que conocemos, se emite mil veces más energía en ondas gravitatorias que la desprendida en forma de luz por todas las estrellas de todas las galaxias del universo visible juntas. Por tanto, los fenómenos más ruidosos del universo no son los más brillantes, ni viceversa. Las dos clases de energía vienen a constituir sendos sentidos de lo que está sucediendo ahí fuera.

Tal como Peter S. Shawhan explicó en estas páginas [*véase* "La detección de las ondas gravitatorias"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2005], la teoría de Einstein calcula muchas características de las ondas gravitatorias. Nos dice que pasan a través de todo, que se propagan desde los confines más lejanos del espaciotiempo y desde los momentos iniciales de la gran explosión, hasta alcanzarnos. Nos dice que los pares de estrellas ordinarias que orbitan una alrededor de otra, incluidas las binarias que ya conocemos, han de estar emitiendo ondas gravitatorias. Nos dice exactamente cuánta energía radian. Declara, por fin, la conformación matemática del espaciotiempo distorsionado por los agujeros negros, que se traduce en ondas gravitatorias, predecibles con mucha exactitud y emitidas por cualquier objeto que caiga en su interior.

Disponemos, pues, de un modelo matemático bien definido que describe las maneras en que el espacio y el tiempo deben vibrar. Si detectásemos las ondas gravitatorias, contaríamos con un método de nuevo cuño para explorar el universo visible y, al mismo tiempo, para someter a prueba ideas fundamentales sobre el espacio y el tiempo.

Hay pruebas indirectas precisas de que las ondas gravitatorias existen. A Russell Hulse y a Joseph Taylor les concedieron el premio Nobel de 1993, en parte, por medir los efectos de la pérdida de energía por ondas gravitatorias en un sistema púlsar binario. Pero hasta ahora, no se ha detectado directamente ninguna onda gravitatoria.

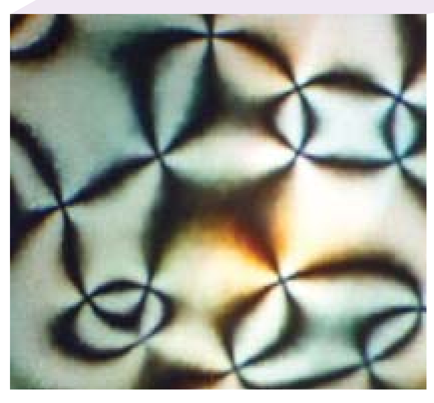
Micrófonos extraordinariamente sensibles

A los astrónomos les gustaría sintonizar la polifonía de la banda sonora del cosmos y escuchar lo que está sucediendo por todas partes. Pero estas vibraciones, pese a su mucha energía, son muy difíciles de detectar. (Guarda relación con que lo atraviesen todo.)

2. EL PASO DE UNA ONDA GRAVITATORIA estira y encoge el espacio. Se exagera en esta simulación, donde una serie de anillos (*verde*) se deforman por el paso de una onda gravitatoria (*púrpura*). Al contrario que una onda acústica, que distorsiona el aire por compresión, el paso de una onda gravitatoria distorsiona el espacio al estirar su forma sin comprimirla.







3. LOS FISICOS HAN EXPLORADO A FONDO el espectro de la radiación electromagnética, desde las bajas frecuencias y largas longitudes de onda de las ondas de radio hasta las altas frecuencias y cortas longitudes de onda de los rayos gamma, pasando por el espectro de la luz visible. Las ondas gravitatorias presentan su propio espectro, que se puede representar en hertz, o ciclos por segundo. Los interferómetros láser terrestres pueden oír intervalos de ondas de alta intensidad y alta frecuencia, correspondientes a la muerte y final unión de dos estrellas en una. LISA, la Antena Espacial de Interferometría Láser, podrá detectar los retumbares más lentos y extensos que caracterizan tanto a agujeros negros de mucha mayor masa que las estrellas como a las primeras etapas de las fusiones estelares. Un ejemplo de fusión que ocurrirá en el futuro lejano es la del par de agujeros negros supermasivos del cúmulo de galaxias Abell 400, que se muestra en la radioimagen en falso color a la izquierda, en la página siguiente. LISA "oirá" también las ondas gravitatorias de las primeras etapas de la evolución del universo y comprobará las teorías que explican la forma adquirida por el espacio y el tiempo.



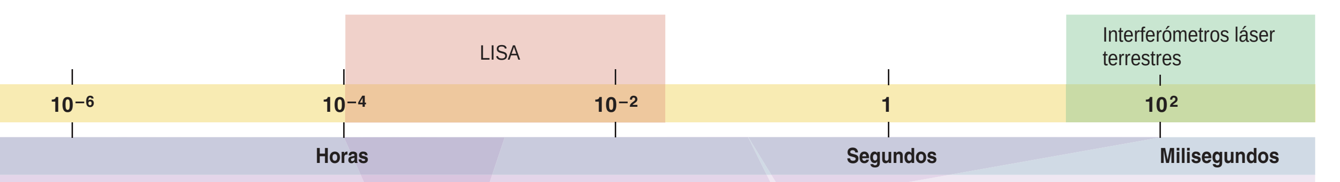
CORTESIA DEL OBSERVATORIO GRAVITACIONAL EUROPEO/*American Scientist*

4. EQUIPOS DE INVESTIGACION DE TODO EL MUNDO cooperan en la detección de ondas gravitatorias, a través de una red terrestre de interferómetros láser. Cada detector porta dos brazos de varios kilómetros de largo, equipados con espejos que reflejan luz láser entre ellos. La medición precisa de las variaciones en la intensidad de esta luz de una sola longitud de onda detecta minúsculos movimientos de los espejos, indicativos de una ondulación del espacio. Aquí se ve el observatorio franco-italiano VIRGO, cerca de Pisa, uno de los cinco observatorios interferométricos construidos hasta la fecha. El proyecto de mayor magnitud es LIGO, Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser, formado por interferómetros en forma de L de 2 y 4 kilómetros de largo, en Hanford, estado de Washington, y Livingston, Luisiana.

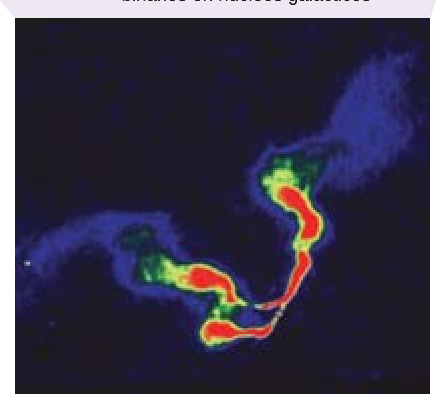
Cerca de los agujeros negros, el espaciotiempo está muy deformado, tanto, que escapar de ellos resulta imposible si se cae en su vecindad. Sin embargo, las ondas gravitatorias que nos alcanzan desde muy grandes distancias distorsionan el espacio sólo en un grado minúsculo, menor que el cociente entre el tamaño del agujero negro y la distancia a que se encuentre. Otra manera de decir lo mismo: el espaciotiempo es el medio más rígido que hay, hasta el punto de que una enorme cantidad de energía sólo crea en él vibraciones minúsculas. ¿Cómo podremos, entonces, oírlas?

Por donde pasa una onda gravitatoria, se estira y encoge el espacio, lo que significa que se modifica la distancia entre objetos. Para una fracción de estiramiento dada, el cambio en la distancia será mayor cuanto más separados se encuentren los cuerpos. Nuestra tarea, pues, consiste en medir variaciones minúsculas en la distancia entre objetos muy separados. La interferometría láser ofrece un modo de detectar, con extraordinaria sensibilidad, minúsculas dilataciones en distancias grandes. En esa técnica se apoyan los mejores detectores de ondas gravitatorias.

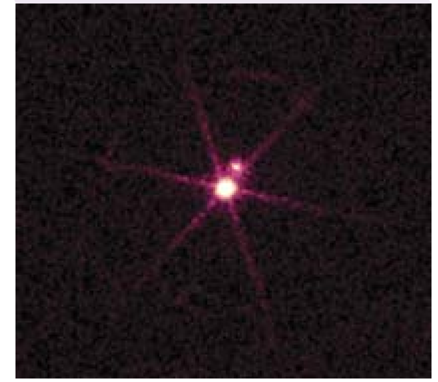
La luz láser es un “color puro”, formado por ondas de sólo una longitud de onda. En el interferómetro, la luz de un láser se refleja en un espejo. Cualquier alteración de la distancia al espejo cambia la longitud de onda de la luz. (Puesto que es una deformación del espaciotiempo, vale imaginar que este cambio consiste en el corrimiento Doppler asociado al movimiento del espejo.) La luz reflejada se combina entonces con luz láser original no reflejada, de modo que ambos conjuntos de ondas se interfieran. La luz cambia de brillo en razón del punto de sus vibraciones relativas en que se encuentren los dos conjuntos de ondas láser. Al medir las variaciones de la intensidad de la luz se determinan con muy alta preci-



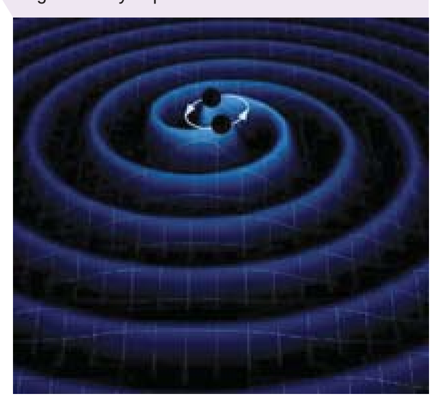
Agujeros negros supermasivos binarios en núcleos galácticos



Agujeros negros, estrellas compactas capturadas por agujeros supermasivos en núcleos galácticos y estrellas binarias en la galaxia



Fusión de estrellas de neutrones binarias y agujeros negros estelares en galaxias lejanas; abultadas estrellas de neutrones giratorias y supernovas



sión los minúsculos movimientos del espejo, aunque esté muy lejos.

Los detectores interferométricos de ondas gravitatorias actualmente instalados en tierra (que se describen con detalle en el artículo de Shawhan) miden movimientos mucho menores que un núcleo atómico en distancias de varios kilómetros. El detector que se instalará en el espacio, la "Antena Espacial de Interferometría Láser" (LISA), medirá movimientos mucho menores que un átomo en distancias de 5 millones de kilómetros, unas 13 veces la distancia a la Luna.

Veinte octavas de sonido del espaciotiempo

La razón de construir interferómetros terrestres (LIGO, u Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser, y otros en distintas partes del globo) y orbitales (LISA) es que observan diferentes frecuencias de ondas gravitatorias, tal y como los telescopios ópticos y los de radio captan frecuencias de la radiación electromagnética muy dispares. Abarcan el teclado de un piano de 20 octavas. Darán, pues, con fenómenos de universos muy distintos también.

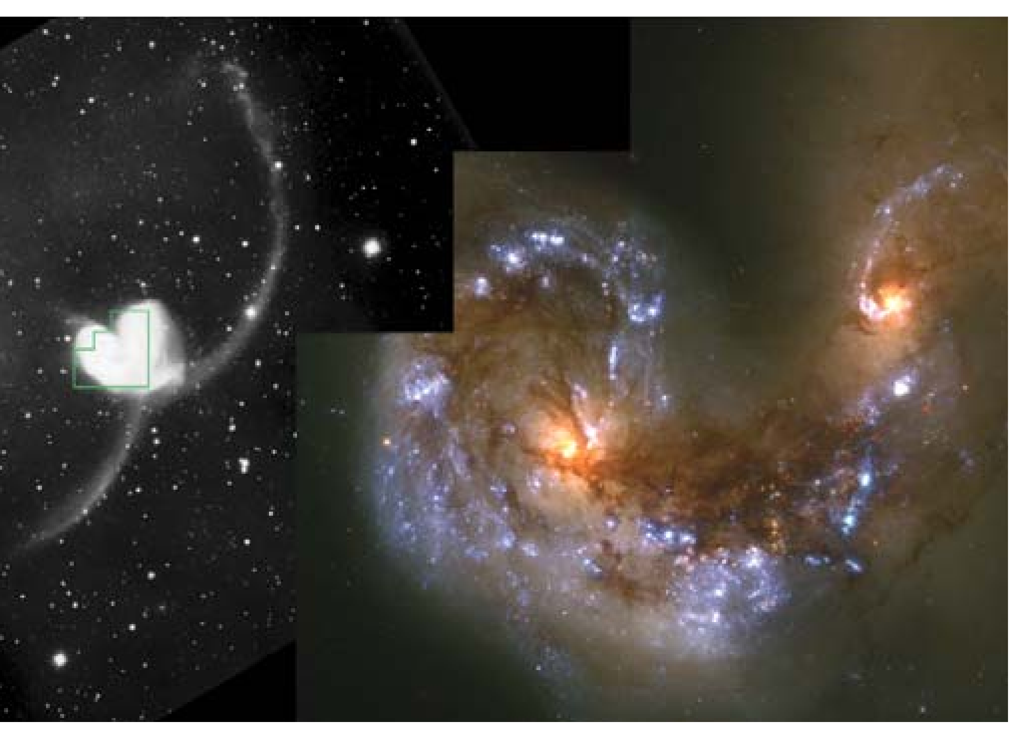
Los detectores terrestres perciben las vibraciones del espaciotiempo a las frecuencias audibles, en una banda alrededor de los 100 ciclos por segundo, o hertz, de algo más de tres octavas, el registro de una soprano versátil. Corresponden a las estrellas de neutrones y agujeros negros de masa parecida a la de una estrella. Cuanto más deprisa giran sobre sí mismos y alrededor de otros, momentos antes de su catastrófica fusión, más resuenan. LIGO oirá esos estertores de muerte estelares.

En el espacio, los detectores pueden oír frecuencias un millón de veces más bajas. Este profundo retumbar, en una amplia banda alrededor de un milihertz, se origina en fusiones catastróficas de agujeros negros mucho mayores que los que percibe LIGO, con masas que multiplican millones de veces la de una estrella. Pueden también venir de estrellas binarias, que estén orbitando una alrededor de la otra más despacio y a mayor distancia. Las estrellas binarias son tan comunes, que sus ondas gravitatorias se confunden y en algunas frecuencias serán la principal fuente de "ruido" para LISA. Para esta antena espacial, el universo será un bullicio. En cuanto funcione, sentirá una cacofonía. Habrá que discriminar entre sonidos, cual si se tratara de entender conversaciones distintas en una fiesta en la que todos hablan a la vez.

Los estilos de observación de LIGO y de LISA difieren bastante. LIGO se halla a la espera de los sonidos de las fusiones de estrellas, breves ráfagas de intensa actividad. Tales episodios de fusión se producen sin cesar en el universo, aunque desconocemos su cadencia o cuándo se producirá una fusión cercana a LIGO y pueda así percibirla. En razón de esa cadencia de episodios, y dependiendo también de nuestra fortuna, LIGO podría detectar ondas gravitatorias lo mismo este año que el decenio que viene.

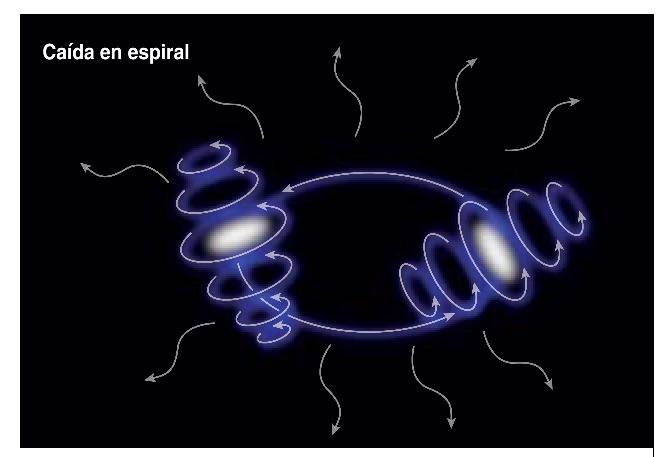
Cuando LISA se halle en el espacio, quizá dentro de diez años, detectará inmediatamente ondas gravitatorias de alguna fuente conocida. A partir de ese momento habrá que clasificar e identificar una amplia variedad de ruidos cósmicos familiares y extraños.

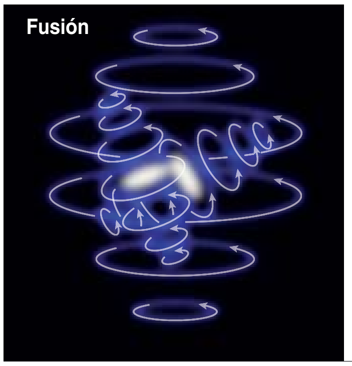
¿Qué aprenderemos de la radiación gravitatoria cuando se detecte? Mucho acerca de lo que sucede en el universo, gracias a una nueva manera de hacer astronomía. Estudiaremos la física de la gravedad y del espaciotiempo de manera inédita; los resultados confirmarán lo que creemos saber —esto es, la teoría de Einstein del espaciotiempo— o nos enseñarán algo hasta ahora desconocido sobre el espaciotiempo. Quizá nos sorprendan fenómenos nuevos; por ejemplo, estados radicalmente inéditos de masa y energía cuya existencia hasta ahora sólo hemos sospechado. Un tal descubrimiento arrojaría luz sobre la unificación de las ideas sobre el espacio y el tiempo con las relativas a la energía y los cuantos, quizá bajo la forma de una teoría de cuerdas, unificación que se cuenta entre los misterios más profundos de la física.

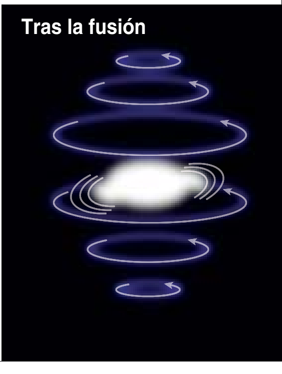


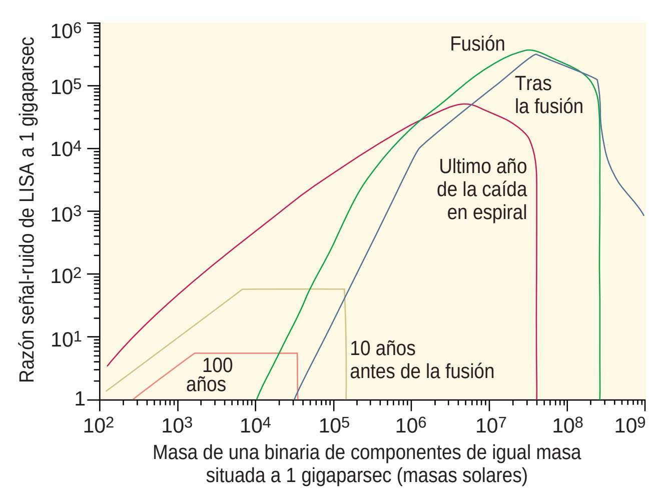
5. LAS IMAGENES DEL TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE (*con una ampliación de la zona contorneada en la imagen tomada por un telescopio terrestre*) prueban que las galaxias espirales NGC4038 y NGC 4039, las "galaxias antena," colisionan entre sí, un choque a 63 millones de años luz de la Tierra, que dura ya 100 millones de años. A medida que avanza el proceso, los agujeros negros supermasivos de los centros de las galaxias se hundirán hacia el centro de la galaxia que se está formando, proceso que LISA debería detectar. Aunque las galaxias tardan miles de millones de años en formarse, son tan numerosas, que fusiones así pueden suceder en una u otra parte muchas veces al año.

CORTESIA DE BRAD WHITMORE, INSTITUTO DE LA CIENCIA DEL TELESCOPIO ESPACIAL Y NASA/*American Scientist*









6. LAS FUSIONES DE PARES DE AGUJEROS NEGROS se desarrollan en tres etapas, cada una con un perfil “sonoro” distintivo. Durante la primera etapa, en la que uno va cayendo en espiral sobre el otro, se emite un conjunto sonoro constante, como una sola nota musical que gradualmente se va haciendo más aguda. Momentos antes de la fusión, la nota aumenta de repente en intensidad y tono. Después de la fusión, la radiación gravitatoria se extingue y desaparece. El gráfico muestra la intensidad predicha de la señal que LISA recibiría a lo largo de un año de observación de las diversas etapas de un tal suceso situado a 1 gigaparsec de la Tierra, aproximadamente una cuarta parte de la distancia al horizonte del universo observable.

CORTESIA DE LISA *International Science Team* (*arriba, izquierda*); TOM DUNNE, ADAPTADO DE CUTLER Y THORNE, 2002 (*gráfica*)/*American Scientist*

Agujeros negros y binarias

Los episodios más espectaculares que registrará LISA serán enormes y retumbantes: las caídas en espiral de imponentes agujeros negros sobre otros, en alguna parte del universo, hasta que se fusionen en uno solo y mayor. Este agujero final pesará mucho menos que la suma de los dos de partida. La diferencia de masa se radiará en forma de ondas gravitatorias. Como he mencionado antes, una de estas fusiones brilla, en términos de potencia radiada, más que el resto del universo.

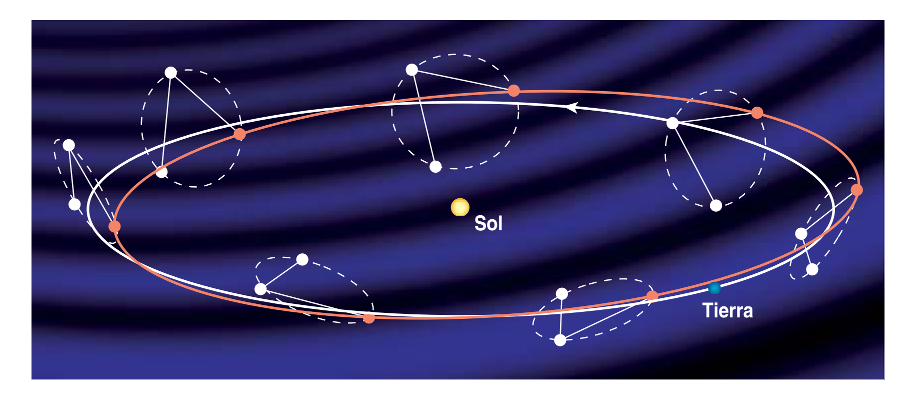
Durante un largo intervalo, los agujeros negros en órbita mutua emiten un conjunto de sonidos casi constantes, como una sola nota de un violín que sólo muy lentamente se fuese agudizando. Momentos antes de que los agujeros se fundan, la nota, rápidamente, se vuelve más aguda e intensifica al mismo tiempo, como la floritura de un virtuoso. Por fin, después de la fusión, el sonido se desvanece rápidamente, como las reverberaciones en la sala de conciertos.

Creemos que las fusiones suceden con bastante frecuencia por doquier en el universo. La mayoría de las galaxias tienen un agujero negro de gran masa en su mismo centro. No hay galaxia que no se haya fundido con otra, o la haya engullido, en más de una ocasión; así crecen las galaxias. Cuando dos galaxias se fusionan, sus respectivos agujeros negros centrales se hunden en el centro de la nueva galaxia porque, en sus interacciones gravitatorias, ceden energía a las estrellas y al gas. Los agujeros terminan por encontrarse y fundirse. Hay unos diez mil millones de galaxias que oír. Si cada una participase en una fusión galáctica una sola vez en sus diez mil millones de años, habría, en promedio, un episodio al año.

Pero los agujeros negros de mayor masa no tienen que esperar tanto para engullir algo; atraen a sí a los objetos de menor talla que se hallen en su vecindad. Los agujeros imponentes moran en los densos enjambres de estrellas del centro de las galaxias; siempre hay alguna estrella que se acerca demasiado.

En ocasiones un remanente estelar muy compacto —una estrella de neutrones o un agujero negro con una masa parecida a la de una estrella— queda atrapado en una danza de la muerte: gira, muchas veces, alrededor de un agujero negro masivo, hasta que cae en el horizonte de sucesos del agujero y desaparece engullida. Mientras baile, emitirá radiación gravitatoria. En ella se registrarán una historia de la órbita y un mapa detallado del espaciotiempo en los alrededores del agujero negro masivo. Recuérdese que el agujero negro sólo se compone de gravedad y que la teoría de Einstein describe la estructura de los agujeros negros. Estos episodios nos informan sobre la estructura de los propios agujeros negros: la forma en que el espaciotiempo se ata a sí mismo en unos nudos estables y rotatorios, a los que llamamos agujeros negros.

LISA dispone de objetivos seguros, también. Nuestra galaxia está llena de estrellas. Las estrellas siguen un ciclo vital. Son normales sólo mientras dure su combustible de hidrógeno: muchas de ellas se han quemado ya y muerto. La mayoría de las veces, el remanente es una brasa pequeña y densa, vale decir, una enana blanca o una estrella de neutrones; en muchas ocasiones, como las estrellas tienden a formar sistemas binarios, el remanente per-



7. LA CAPACIDAD DE LISA de detectar ciertos sucesos viene en parte de la longitud de sus brazos, en parte de su diseño (*véase la figura 10*) y en parte de su aislamiento del ruidoso entorno geofísico de la Tierra. Se lanzarían tres naves espaciales a una órbita solar circular, en el plano de la eclíptica, donde seguirá a la Tierra a lo largo de unos 50 millones de kilómetros. Las naves espaciales formarán un triángulo equilátero, con su plano de rotación inclinado 60 grados con respecto a la eclíptica y brazos del interferómetro de 5 millones de kilómetros de largo.

tenece también a un sistema binario, con un compañero similar. Esos remanentes que orbitan uno alrededor de otro, con períodos de entre algunos minutos y una hora, irradian a las frecuencias que LISA oirá.

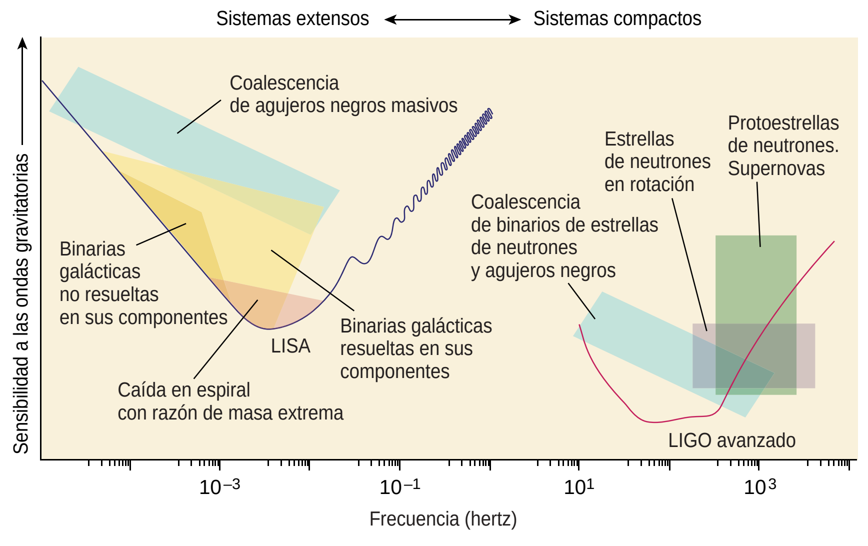
Conocemos algunas binarias cercanas, descubiertas con telescopios normales, que LISA podría captar. Las llamamos “binarias calibradoras”, pues disponemos ya de una idea madura de sus características, su frecuencia y su distancia. Gracias a LISA sabremos mucho más; la morfología de la onda gravitatoria nos revelará su inclinación, su masa precisa y otras características. Las binarias próximas garantizarán que LISA realmente funciona y detecta ondas gravitatorias. Millares de binarias más distantes se mezclarán en un ruidoso coro de fondo, que LISA percibirá en cuanto se conecte.

Desde el universo lejano

Con nuestras teorías acerca de la emisión de ondas gravitatorias y los datos de LISA, convertiremos las ondas gravitatorias en un instrumento para establecer las distancias a las galaxias del universo lejano. Midiendo el sonido sostenido de la fusión de un agujero negro binario remoto —cuánto tarda en cambiar de nota—, podremos determinar la masa de los agujeros negros que se fusionan. Midiendo su intensidad tonal, averiguaremos a qué distancia se hallan. Se trata de una manera nueva de explorar la expansión cósmica; resultará más exacta y directa que las demás, siempre y cuando sea cabal nuestro conocimiento de la física de las fusiones de agujeros negros.

Este proyecto tropieza con una dificultad: hay que identificar la galaxia anfitriona en luz visible (porque necesitamos una medida independiente del corrimiento hacia el rojo, o estiramiento de las longitudes de onda a causa de la expansión del universo). No sabemos si será posible. Para las binarias ruidosas, LISA nos permitirá a veces calcular la dirección por la que viene el sonido, mediante la combinación de los datos de diversas partes del año (como si fuera un micrófono estéreo). La mejor precisión será de cerca de un grado de arco. En un sector de cielo de ese tamaño caben decenas de millares de imágenes de galaxias. Es razonable esperar que la singular galaxia donde se han fusionado un par de agujeros negros presente un aspecto diferente, tanto como para que la reconozcamos, quizá por la variación temporal de la actividad nuclear en el visible, quizá por los cambios que haya inducido en su conformación la reciente fusión galáctica.

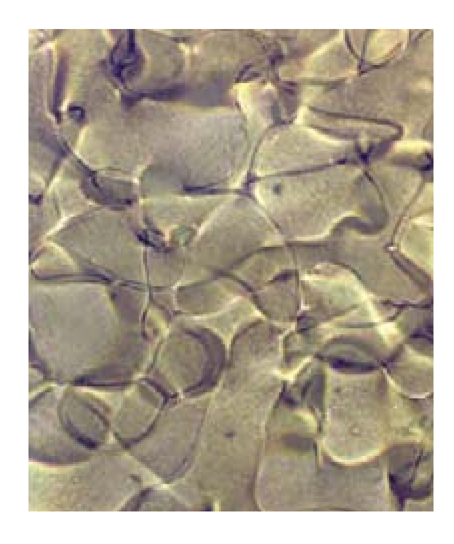
La cartografía precisa de las distancias con supernovas llevó al descubrimiento de la energía oscura cósmica que acelera la expansión del universo; con una medición mejor de las distancias gracias a las ondas



8. LOS VIOLENTOS SUCESOS DONDE PARTICIPAN SISTEMAS COMPACTOS —estrellas de neutrones y agujeros negros— estarán, se supone, al alcance de los observatorios LIGO a medida que éstos vayan refinándose. Cada interferómetro tiene una curva de ruido, que define las frecuencias y las amplitudes de las ondas de las que podrá recibir una señal suficientemente clara como para distinguir del fondo ruidoso un episodio (*líneas rojas y púrpuras*). Las regiones sombreadas indican los intervalos en los que deberían detectarse ciertos sucesos. LIGO está a la escucha de la rotación y coalescencia de estrellas de neutrones binarias compactas y los colapsos de núcleos estelares que se convierten en supernovas. La curva de ruido de LISA sintoniza sucesos de más baja frecuencia, que no se pueden detectar desde la Tierra. En particular, LISA podría observar la generación de agujeros negros supermasivos.

TOM DUNNE (*arriba*); STEPHANIE FREESE, DATOS DE LISA *International Science Team (abajo)/American Scientist*

9. ALGUNOS MODELOS de la formación del universo incluyen "cuerdas cósmicas", que llenarían el universo de radiación gravitatoria. Las cuerdas cósmicas podrían generarse por enfriamiento rápido durante la expansión del universo. Este proceso es análogo al crecimiento y coalescencia de burbujas de una nueva fase en un cristal líquido, con la formación de cuerdas (*a la derecha*).



gravitatorias profundizaremos en esa nueva fuerza de la naturaleza.

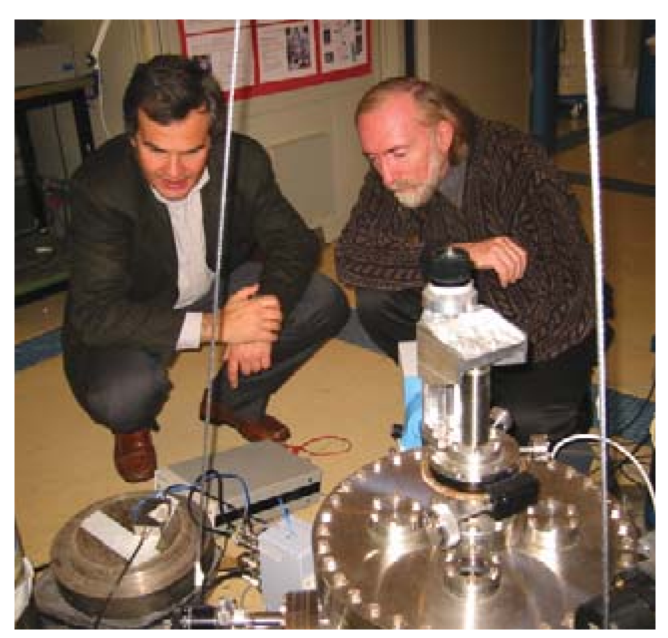
La sección de cuerdas

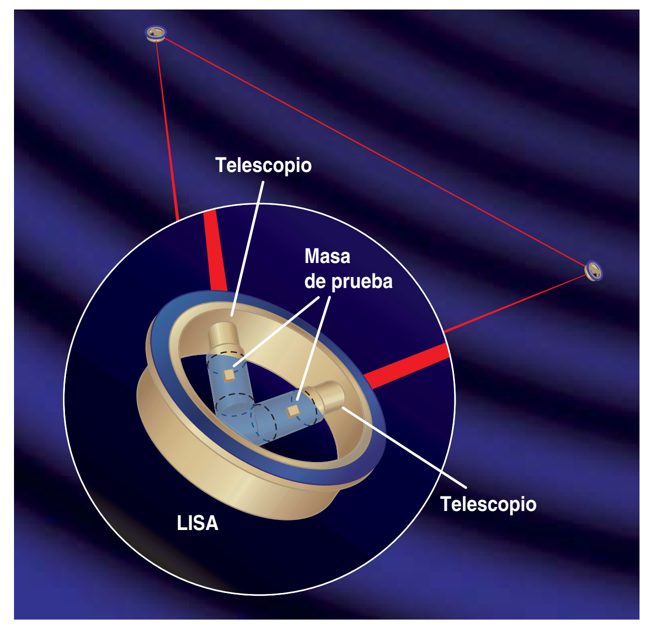
Por extrañas que parezcan, las fuentes de que acabamos de hablar, incluso las enormes fusiones de agujeros negros binarios, serán parte del curso normal de las cosas, según nuestro conocimiento actual del universo. Pero, ¿no podría haberlas nuevas e inesperadas?

La física llega ahora hasta los instantes subsiguientes a la gran explosión, a temperaturas increíblemente altas, incluso hasta la época de la inflación, cuando la expansión cósmica recibió el impulso por el que ha devenido de la magnitud que ahora contemplamos. Si retrocedemos lo suficiente, ni siquiera el espacio y el tiempo eran como hoy. Según una versión cuántica aún no comprobada de la teoría de Einstein, la teoría de cuerdas, el espacio tiene 10 dimensiones, muchas muy curvadas ("compactadas"), y todas las partículas de materia, y quizás incluso el espaciotiempo y las ondas gravitatorias, se componen en última instancia de minúsculas cuerdas cuánticas. El problema de la teoría de cuerdas es que, a pesar de su milagrosa capacidad de relacionar ideas de diferentes partes de la física y de las matemáticas, no se ha encontrado todavía ninguna prueba real que la avale. ¿Podrá LISA captar aunque sea un susurro de ese tipo de física?

Hay al menos una clase de objeto nuevo, una clase genuina de "cuerda" que, si existiese, llenaría el universo de radiación gravitatoria audible por LISA. Las minúsculas cuerdas cuánticas podrían también dar lugar a *supercuerdas cósmicas*, de microscópica finura y astronómica longitud.

Muy al principio de los tiempos, el rápido enfriamiento del universo, al expandirse, debió de formar una densa red de esas cuerdas. Semejante proceso de formación recuerda el modo en que se agrietan los cubitos de hielo cuando caen repentinamente en agua, el patrón irregular de los dominios de aleación en una espada de samurái finamente forjada o las líneas de vórtice atrapadas que acostumbran





10. ¿COMO "OIRA" LISA LAS PEQUEÑAS ONDULACIONES DEL ESPACIOTIEMPO? Los láseres de la antena detectarán el movimiento de una masa de prueba, un cubo de oro y platino que flotará libremente dentro de cada nave espacial, protegido de toda fuerza, salvo de la gravedad. El diseño aplica lo aprendido con balanzas de torsión, que detectan minúsculas fuerzas en la Tierra. En la fotografía, los físicos Stephano Vitale, de la Universidad de Trento, y Kip Thorne, del Caltech, examinan modelos del equipo que se está desarrollando para el "LISA Pathfinder", misión que ensayará durante seis meses, se prevé que en 2009, las técnicas necesarias para proteger las masas de prueba de otras fuerzas. Se espera que LISA alcanzará sensibilidad bastante para detectar un estiramiento del espaciotiempo casi tan pequeño como un núcleo atómico a través de los 5 millones de kilómetros de longitud de sus brazos.

CORTESIA DE AJIT SRIVASTAVA, INSTITUTO DE FISICA, BHUBANESWAR, INDIA (*arriba*); CRAIG J. HOGAN (*abajo, izquierda*); TOM DUNNE (*abajo, derecha*)/*American Scientist*

a crearse en el enfriamiento brusco de superconductores, superfluidos o cristales líquidos.

A medida que el universo se va expandiendo, las cuerdas se desenredan y mueven casi a la velocidad de la luz; cuando se cruzan pueden intercambiar fragmentos y crear lazos de cuerdas. Se acumula una cantidad notable de lazos, que no desaparecen fácilmente. Los lazos en cuestión se agitan por doquier, aunque, casi estables, permanecen largo tiempo y se contraen con parsimonia. Pierden energía en forma de ondas gravitatorias. Según algunos modelos de la inflación derivados de la teoría de cuerdas, la intensidad de las ondas gravitatorias las pondría al alcance de LISA.

Los episodios de tipo cuerda más interesantes en que intervienen estos lazos son las ocasiones, bastante raras, en que un lazo, inusualmente cercano, emite ondas gravitatorias en nuestra dirección en una especie de latigazo o formación de una cúspide catastrófica. El movimiento de la cuerda, por un instante, en un lugar, se aproxima formalmente a la velocidad de la luz; cuando este momento se acerca, se emiten y se amplifican ondas gravitatorias. Si se detectasen tales pulsos, tendríamos una abundante fuente de datos y una ventana inédita a la teoría de cuerdas actuante en el mundo real.

Cabe, asimismo, que podamos ver directamente ondas gravitatorias del universo primitivo, del final de la inflación quizá, cuando los campos que dirigían la gran explosión convirtieron su energía en luz, materia y antimateria, o de una posterior transición de fase, cuando la luz y la materia produjeron el exceso de la materia sobre la antimateria, origen de nuestros átomos. Las ondas gravitatorias son tan penetrantes, que nos alcanzan desde cualquier momento de la historia del universo, desde el mismo comienzo de la gran explosión.

Picómetros en gigámetros

¿Cuándo volará LISA? Su construcción entraña notables dificultades, que habrá de superar un equipo de científicos e ingenieros de los Estados Unidos y Europa.

La idea básica es simple. Unos cubos de oro y platino flotan libremente dentro de tres naves espaciales, uno en cada nave, sin tocar nada. Están protegidos de todas las fuerzas, excepto de la gravedad; la nave detecta con delicada precisión su posición y maniobra con minúsculos impulsores para que sus paredes no acaben topándose con los cubos. La luz de un láser se refleja en los cubos y se expide a los demás ingenios de LISA, a cinco millones de kilómetros, y se observa con telescopios. Así se miden los cambios de distancia sutiles entre los cubos causados por las ondas gravitatorias. Los cambios medidos en las distancias vienen del estiramiento relativo del espaciotiempo, unos 0,05 picómetros, 10^{-23} veces menor que la distancia entre los cubos. Esa distancia es mucho menor que un átomo; casi el diámetro de un núcleo atómico.

Parece increíble que se piense construir un instrumento que medirá distancias mucho mayores que la distancia a la Luna con una precisión de menos del tamaño de un átomo. Entre los innumerables problemas técnicos, no debe olvidarse la creación de un entorno para los cubos que esté libre de todas las fuerzas, salvo las gravitatorias. La nave espacial que rodea la masa debe detectar la posición del cubo, sin perturbarla, y seguirla a medida que la van alterando las oscilaciones del espaciotiempo. Los acelerómetros más sensibles que existen —las balanzas de torsión, aplicadas también a la búsqueda de minúsculas fuerzas de las dimensiones extra y de nuevas formas de la gravedad— contribuyen a minimizar las fuerzas.

Una de las razones de que LISA vaya al espacio es el ruido gravitatorio en la Tierra. A fin de comprobar que sus dispositivos ofrecen la exquisita precisión requerida, en particular tras los rigores del lanzamiento, debemos enviar máquinas al espacio. Dentro de unos años se lanzará el satélite “LISA Pathfinder” para poner a prueba las técnicas más sensibles de LISA, que no pueden someterse a ensayo en el dominio terrestre. Se tratará de un solo satélite; no podrá, pues, detectar ondas gravitatorias, pero las masas y los sensores de prueba de a bordo, y los minúsculos impulsores del orden del micronewton, gracias a los que maniobrará muy suavemente, tendrán igual diseño que los de LISA. Se han fabricado ya prototipos de esos sistemas. Hasta donde sabemos, no hay ningún obstáculo técnico fundamental que impida construir LISA.

Faltan años para el lanzamiento real de LISA. En su empeño, largo y complejo, deberán comprometerse científicos, ingenieros e instituciones de ambos lados del Atlántico, sin olvidar su financiación. Costará en torno a los mil millones de euros. Mas hay precedentes; ese presupuesto se queda pequeño comparado con el “Gran Colisionador de Hadrones” del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), o con el del telescopio espacial Hubble. No es habitual que el primer paso en un área tan nueva se lleve tanta inversión, pero no es menos insólito dar con un proyecto científico para sondear el universo de una manera radicalmente innovadora.

El autor

Craig J. Hogan es profesor de física y astronomía de la Universidad de Washington en Seattle. Fue codescubridor de la aceleración cósmica causada por la energía oscura. Lleva estudiando las fuentes de las ondas gravitatorias desde hace más de 20 años. Forma parte del equipo científico internacional de LISA.

Bibliografía complementaria

EINSTEIN'S UNFINISHED SYMPHONY: LISTENING TO THE SOUNDS OF SPACE-TIME. M. Bartusiak. National Academies Press; Washington, D.C., 2000.

AN OVERVIEW OF GRAVITATIONAL-WAVE SOURCES. C. Cutler y K. S. Thorne en *Proceedings of GR16* (Durban, Sudáfrica, 2001), 2002.

LA DETECCIÓN DE LAS ONDAS GRAVITATORIAS. P. S. Shawhan en *Investigación y Ciencia*, n.º 349, págs. 76-84; octubre, 2005.

GRAVITATIONAL WAVES FROM LIGHT COSMIC STRINGS: BACKGROUNDS AND BURSTS WITH LARGE LOOPS. Craig J. Hogan en *Physical Review D*, vol. 74, pág. 043526; 2006.

Marc Boada

Esclerómetro de H. B. Saussure

Para manipular la materia importa conocer sus propiedades. Su dureza, por ejemplo. Por tal se entiende la resistencia de un material a ser rayado. La determinación cuantitativa de esta propiedad física desempeña una función central en metalurgia e industria; piénsese, por ejemplo, en la dureza de las capas protectoras de aparatos de cualquier tipo o de las lentes.

Existen distintos durómetros, que suministran valores fiables y normalizados, aptos para el análisis cuantitativo. Lo que no obsta para que geólogos y mineralogistas prosigan con sus métodos rudimentarios, que sólo ofrecen una información orientativa de la dureza del mineral de interés. Si el lector toma un trozo de fluorita y raya su superficie con la uña, observará que no ha dejado señal alguna. Pero si hace lo propio con un trozo de calcita, percibirá la hendidura abierta. Con otras palabras, la dureza de la calcita se halla comprendida entre la dureza de la uña y la dureza de la fluorita.



Réplica del esclerómetro de H. B. Saussure, realizada a escala 4/5. (El soporte original para el mineral a rayar no se conserva; el de la fotografía corresponde a una reconstrucción.)

Friedrich Mohs (1773-1839) propuso en 1822 una escala de durezas que sistematizaba ese método comparativo. En la escala de Mohs, así llamada en su honor, al talco, que se raya fácilmente con la uña, se le asigna el número 1; al diamante, el mineral natural de mayor dureza, le corresponde el 10. Unos años antes, Horace Bénédict de Saussure (1740-1799) ideó un método que permitía medir la dureza con cierta precisión. Fundador del excursionismo científico, el naturalista suizo sobresalió también por su habilidad en la experimentación.

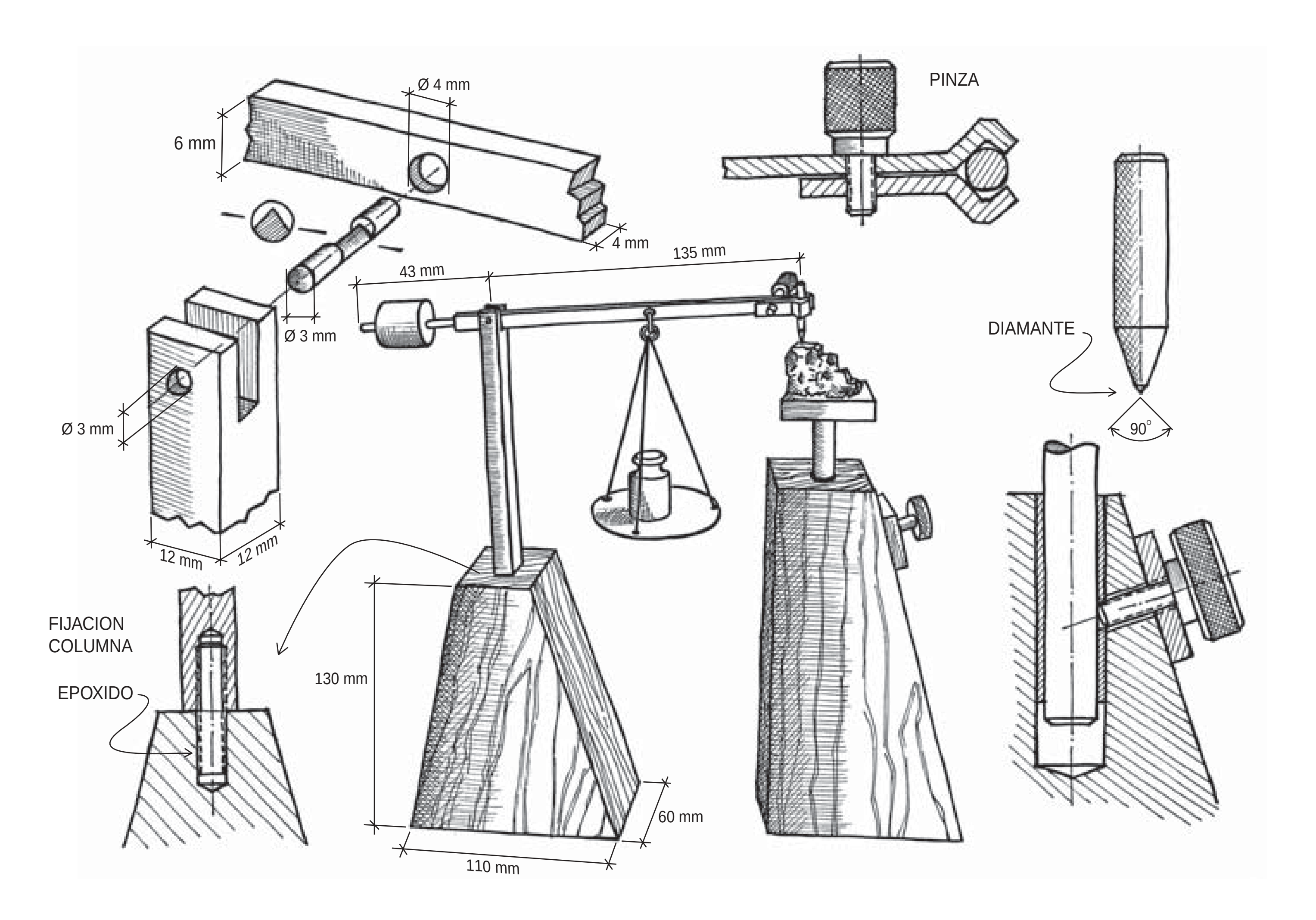
De los instrumentos construidos bajo la supervisión de Saussure que han llegado a nuestros días destaca un esclerómetro (del griego *esclero*, 'dureza', y *metros*, 'medida') con el que se ayudó para determinar la dureza de minerales alpinos. Lo presentó en la Sociedad de las Artes de Ginebra en 1795. Intentemos crear una réplica.

El objetivo de esta reconstrucción es triple. En primer lugar, resulta útil para el coleccionista, pues facilita la determinación de la dureza de sus piezas minerales. Además, la construcción del aparato nos familiariza con la destreza que requiere su manejo y las dificultades prácticas que entraña el acotamiento de los múltiples parámetros a considerar en una medición. Por fin, nos revela el ingenio que desarrolló y la maquinaria de que se valió su creador, al tiempo que comprobamos las prestaciones posibles.

El aparato consta, en esencia, de una balanza de brazos desiguales, con una longitud total de 242 milímetros. La cruz oscila en el interior de una horquilla, a través de un pequeño eje; se mantiene horizontal mediante un contrapeso de latón que equilibra el platillo. En el extremo del brazo largo, Saussure fijaba con un tornillo la punta de acero o diamante encargada de rayar, acción que acometía merced a un peso situado en el platillo.

Si en la construcción del esclerómetro nos mueve una finalidad práctica, buscaremos un prisma de acero poco aleado, de 6 × 4 mm de sección y una longitud de 160 mm para los brazos, una barra cuadrada de 12 × 12 mm y 120 mm de longitud para la columna y un buen taco de madera de 110 × 60 ×130 mm. Estos materiales los mecanizaremos mediante aserrado y taladro, hasta reproducir los diseños del plano. Si nos guía un afán historicista, la columna se reproducirá por forjado; el brazo se estirará al rojo por el mismo método, doblándolo hasta obtener la pinza donde se fija la punta de rayado. La mecanización artesanal condiciona de forma notable el resultado, siempre menos preciso que en una mecanización moderna. (Como es lógico, resulta imposible prescindir de toda ayuda técnica; siempre acabaremos recurriendo a alguna máquina eléctrica o a algún elemento totalmente desconocido a finales del siglo XVIII.)

Conviene centrar la atención en dos elementos críticos: el fulcro y la punta de rayado. El fulcro de la balanza deberá presentar una fricción mínima. Para ello tallare-



mos, con una lima pequeña y fina, dos planos en el eje de apoyo; se trata de obtener una arista aguda, libre de defectos y alineada con el eje. Sobre la arista oscilará el brazo, en el que habremos practicado un taladro por donde se introduce el eje. Por lo que concierne a la punta de rayado, ésta puede realizarse con diamante o con un acero de gran dureza. La geometría de la punta constituirá una constante instrumental, propia de nuestro aparato, que deberemos contrastar mediante pruebas sistemáticas con materiales de dureza conocida.

Me he servido de una punta de diamante cónica con un ángulo de casi 90 grados, extraída de un lápiz para marcar o escribir sobre materiales duros. Con esta geometría para la punta, utilizo cargas en el platillo de entre 100 y 200 gramos. Luego, ensamblaremos el instrumento. Comprobaremos si oscila con suavidad. En mi réplica, obtenida por forja y con manipulaciones muy primitivas, la cruz se desequilibra colocando en el platillo un peso de 0,5 gramos (valor despreciable frente a la carga de trabajo antes citada).

La muestra debe orientarse y desplazarse con suavidad y regularidad bajo la punta de diamante. Sobre un taco de madera se ajusta una tablilla donde se fija el mineral, con cera o adhesivo termoestable. Debe procurarse que la superficie de esa tablilla mantenga una horizontalidad perfecta. El taco se moverá a velocidad constante para obtener la incisión.

Para operar con el esclerómetro, empezaremos por muestras de dureza conocida (en la escala de Mohs). De la dureza creciente nos informa el aumento del peso aplicado al platillo. Y así hasta que la hendidura o raya sea imperceptible. Luego, sin variar el peso, ensayaremos otros materiales relacionando su dureza con el ancho de la raya producida, que mediremos con un microscopio.

Yo utilizo un ocular con un retículo de 0,1 mm. Sobre el retículo se proyecta la imagen de la raya producida. Podemos determinar anchuras de pocas centésimas de milímetro, mediante objetivos de entre 10 y 40 aumentos. En materiales de gran dureza, donde la anchura de la raya ronda las milésimas de milímetro, es necesario utilizar aumentos superiores.

Un segundo método consiste en ajustar, para cada material, el peso mínimo que produce una marca perceptible. En ese caso, el peso mínimo nos indicará la dureza relativa del material.

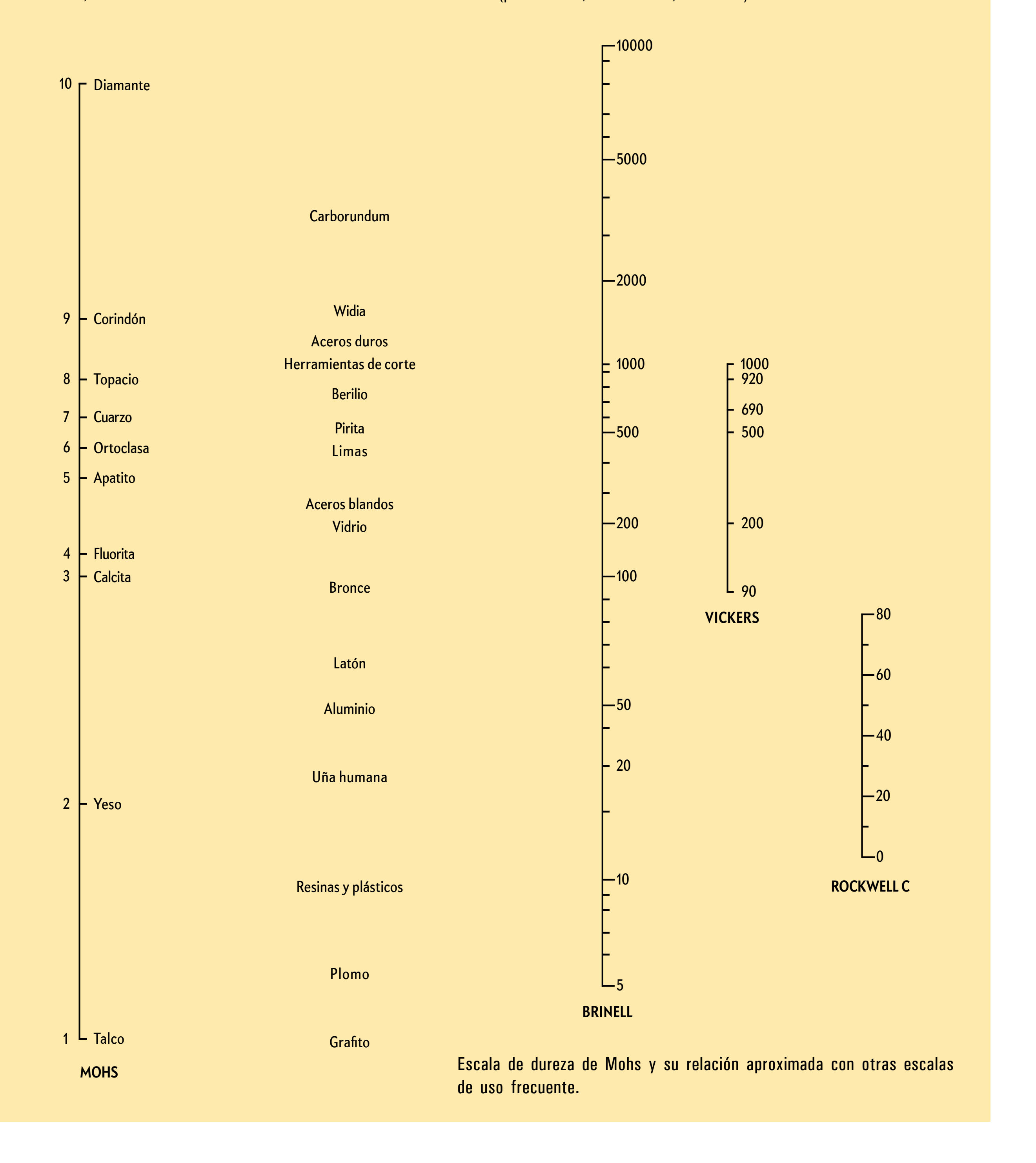
En ambos métodos, la representación gráfica o el análisis matemático de los resultados obtenidos nos descubrirán que la relación entre la anchura de la raya y la dureza en la escala de Mohs no es lineal. Observaremos también que algunos minerales no presentan la misma dureza en todos sus planos cristalinos. Si realizamos medidas en diversas direcciones sobre la misma cara de un cristal cúbico, comprobaremos que la dureza varía de forma gradual según la orientación.

ESCALAS DE DUREZA

La dureza define la resistencia de un material a ser rayado. A escala atómica, corresponde a la resistencia a la deformación mecánica que opone el retículo cristalino. La dureza depende sobre todo de la compactibilidad del retículo, es decir, de la distancia del enlace entre los átomos. En general, la dureza crece con la densidad de empaquetamiento. También existe una relación con el tamaño atómico o iónico: la dureza del material aumenta conforme se reduce el tamaño de los átomos. Y otra con la carga eléctrica y la valencia: cuando éstas aumentan, aumenta también la dureza.

En la industria, sobre todo en el caso de metales y aleaciones, la dureza se mide mediante tres métodos de penetración estandarizados (*gráfica*). En el método Rockwell, una bola de 1/16 pulgadas de diámetro (1,6 milímetros) penetra en el material con una carga de 100 o 150 kg·f (kilogramo fuerza o kilopondio); se mide luego la profundidad de la penetración. En el ensayo Brinell se mide la superficie de una marca realizada también con una esfera. En el Vickers, una pirámide de diamante indenta el material; se mide luego la diagonal.

En todos estos métodos debe tenerse en cuenta la velocidad de marcado, el tiempo de relajación del material, la temperatura y otras propiedades típicas de los metales (plasticidad, elasticidad, etcétera).



Escala de dureza de Mohs y su relación aproximada con otras escalas de uso frecuente.

Jeffrey D. Sachs

Las enfermedades tropicales desatendidas

Con el equivalente al gasto militar de unos días, se podrían controlar completamente las devastadoras enfermedades que afectan a los pobres del mundo

Las excelentes posibilidades que nos brinda la ciencia para mejorar la asistencia social a un mínimo coste son inmensas, pero a menudo las ignoran la población y los responsables de elaborar las políticas gubernamentales. No hay mejor ejemplo que el tratamiento de un grupo de enfermedades tropicales que, aunque provocan la discapacidad o la muerte a muchas personas, son unas grandes desconocidas para norteamericanos y europeos.

Los expertos se refieren a ellas formalmente como “patologías tropicales desatendidas” (ETD). Son infecciones terribles que, juntas, producen tanta enfermedad, discapacidad y muerte como el sida, la tuberculosis y la malaria. A pesar de ello son mucho menos conocidas, en parte porque sólo afectan a los pobres que habitan en los trópicos.

Siete de estas enfermedades son causadas por helmintos (infecciones parasitarias de gusanos): anquilostomiasis, tricuriasis, ascariasis, esquistosomiasis y dracunculosis (gusano de Guinea), oncocercosis y filariasis linfática; tres son infecciones protozoarias: leismaniasis, tripanosomiasis y enfermedad de Chagas; y otras tres son bacterianas: lepra, tracoma y úlcera de Buruli.

Nueve de estas 13 enfermedades (las siete infecciones por helmintos, la lepra y el tracoma) se pueden prevenir o curar con tratamientos muy eficaces, de bajo coste y fáciles de administrar. Como el presidente Jimmy Carter ha demostrado a través de su tenaz liderazgo personal durante 20 años, la filtración del agua con estopilla puede reducir espectacularmente la incidencia de la dracunculosis. Las mosquiteras tratadas con insecticida, que cuestan solamente 5 dólares y duran 5 años, pueden acabar con la transmisión de la filariasis linfática y reducir enormemente la de la malaria.

Todas las enfermedades producidas por helmintos, excepto el gusano de Guinea, se pueden controlar con medicamentos, manteniendo el número de gusanos que infectan a un individuo a un nivel tolerablemente bajo por medio de tratamientos rutinarios. Por ejemplo, en zonas donde estén extendidas las infecciones por helmintos y la esquistosomiasis, todos los escolares deberían recibir, hasta tres veces al año, un tratamiento con medicamentos antiparasitarios. Las empresas farmacéuticas han demostrado que están dispuestas a participar. Merck & Co., GlaxoSmithKline, Johnson & Johnson, Pfizer, Novartis y Sanofi-Pasteur han donado medicinas, entre otras contribuciones, para combatir varias enfermedades. Estas empresas apoyan la difusión de programas de control.

Es hora de que los gobiernos también participen. EE.UU. ha asignado recientemente 15 millones de dólares a la lucha contra las ETD; es un comienzo, aunque supone menos de una décima parte de los aproximadamente 250 millones de dólares anuales necesarios para llevar a cabo una campaña integral en Africa. La mejor estrategia sería combatir conjuntamente las ETD y la malaria. Se pueden tratar con las mismas mosquiteras y el mismo personal sanitario local; son dolencias que se solapan geográficamente en la mayoría de los países tropicales. Además, millones de niños africanos están “poliparasitados”: infectados de malaria y de una combinación de ETD. Estas infecciones múltiples parecen ser especialmente dañinas.

La mejor estrategia sería combatir conjuntamente las enfermedades tropicales desatendidas y la malaria.

Nuestros responsables políticos deberían considerar que el control efectivo de estas enfermedades promueve la estabilidad y buena voluntad mundiales, por medio del desarrollo económico, en mayor cuantía que los gastos militares más elevados a los que se recurre una vez que ha cundido la inestabilidad. Las medidas bien enfocadas, dirigidas al control de enfermedades, han sido hasta ahora muy eficaces, incluso en los países más pobres. Con campañas de vacunación, llevadas a cabo en particular por Rotary International, la viruela fue erradicada y la polio se ha reducido a la milésima parte en todo el mundo.

Una campaña integral para controlar la malaria y las ETD en Africa probablemente no costaría más de 3000 millones de dólares al año, el gasto del Pentágono en dos días. Si cada una de las mil millones de personas del mundo rico dedicara anualmente a esta causa el equivalente a los dos euros de un café, se evitarían la muerte y la afección a varios millones de niños al año y evitaríamos al mundo el grave riesgo que supondría dar vía libre a la enfermedad y la desesperación. Una nueva organización, la Red Global para el Control de las Patologías Tropicales Desatendidas, está ayudando a hacer realidad esta posibilidad.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Juan M.R. Parrondo

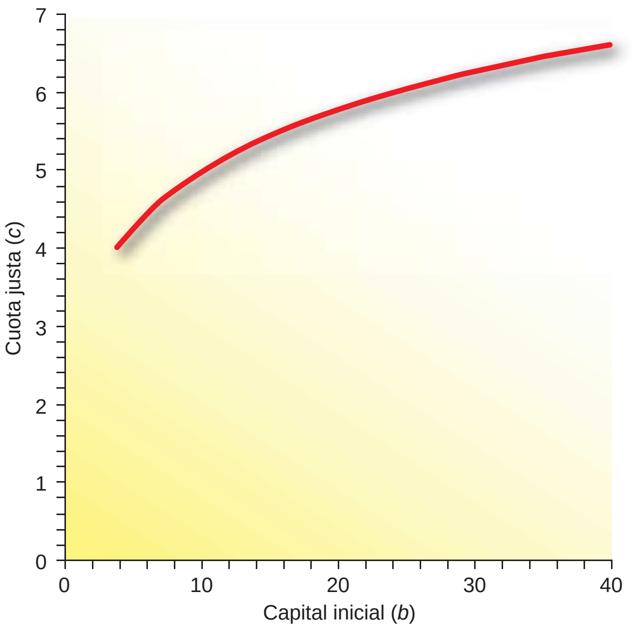
La paradoja de San Petersburgo y la teoría de la utilidad

El mes pasado analizamos la llamada *Paradoja de San Petersburgo*, un juego de azar en el que se lanza una moneda hasta que sale cara y el jugador gana 2^n euros si la primera cara ha salido en la tirada n-ésima. La paradoja surge cuando intentamos responder a la pregunta: ¿cuánto debería pagar un jugador para entrar en el juego? Normalmente, la cuota de entrada en un juego o sorteo debe ser igual a la ganancia media, pero, como vimos el mes pasado, en el juego de San Petersburgo esa ganancia media G_{med} es infinita. En efecto, la probabilidad de que la primera cara salga en la tirada n-ésima es $1/2^n$, de modo que:

$$G_{med} = \frac{2}{2} + \frac{4}{4} + \frac{8}{8} + \frac{16}{16} + \ldots$$

que es evidentemente infinita. De ello se deduce que uno debería entrar en el juego pagando cualquier cuota de entrada, por muy grande que ésta fuese, puesto que siempre la ganancia media será superior. Pero esta conclusión está en contradicción con el sentido común, ya que nadie en su sano juicio estaría dispuesto a pagar un millón de euros para participar en este sorteo.

Hace un mes analizamos la paradoja desde el punto de vista de un casino que pretende organizar el juego y tiene que decidir la cuota de entrada. Ahora vamos a estudiar la paradoja desde el punto de vista de un jugador que sólo va a jugar unas pocas veces. En este caso, la paradoja no tiene en realidad relación con el hecho de que la ganancia media sea infinita, sino con cómo valoramos el riesgo. La misma paradoja ocurre en el juego de San Petersburgo si limitamos los pagos, es decir, si acordamos que, tras por ejemplo 100 tiradas sin salir cara, el jugador no gana nada. En este caso, la ganancia media es de 100 euros; pero, ¿estaría alguien dispuesto a pagar esa cantidad para entrar en el sorteo? El premio puede ser aún enorme: $2^{100} \approx 10^{30}$ si la primera cara sale en la tirada número 100, aunque la probabilidad de ganar más de los 100 euros que cuesta entrar en el sorteo es bastante pequeña (1/64). Hay gente que podría considerar atractivo el sorteo con la cuota de 100 euros, a pesar de que lo más probable es que pierda dinero. Al fin y al cabo, muchos juegan a la lotería, y en ocasiones cantidades considerables, con la esperanza de ganar un premio muy cuantioso con una probabilidad insignificante. Sin embargo, hay una diferencia importante desde el punto de vista psicológico entre la paradoja y la lotería. En el juego de San Petersburgo, para ganar un premio cuantioso tiene que salir un gran número de cruces seguidas en el lanzamiento de la moneda, un evento muy improbable que puede ocurrir o no ocurrir aunque juguemos miles de veces. En el caso de la lotería, el boleto con el "gordo" *tiene que estar* en algún sitio y a *alguien* le tiene que tocar. Es muy distinto creer que ese alguien puedo ser yo a creer que, al lanzar una moneda, las 20 primeras tiradas van a ser cruz. Aunque esta diferencia en la percepción de uno y otro sorteo es irracional, porque ambos sucesos son casi igual de probables.



1. La cuota justa en función del capital inicial según Bernoulli.

Uno de los análisis más conocidos de la paradoja es el que Daniel Bernoulli publicó en la revista de la Academia de Ciencias de San Petersburgo en 1738. De hecho, la paradoja recibe su nombre precisamente por ese artículo. La fama del mismo no se debe a que ofreciera una solución del todo satisfactoria, sino porque en su trabajo Bernoulli sentó las bases de la *teoría de la utilidad*. La teoría trata de cuantificar el beneficio real o *utilidad* que supone para un individuo una determinada cantidad de dinero. El argumento fundamental de Bernoulli era razonable: 100 euros, por ejemplo, es una cantidad considerable para alguien que no posee nada, mientras que es insignificante para una persona que tenga un patrimonio de un millón de euros. Bernoulli propuso que el aumento de utilidad cuando una fortuna de x euros aumenta en una cantidad muy pequeña Δx debía ser $\Delta x/x$. Con este supuesto y un poco de matemáticas, se puede demostrar que el aumento de la utilidad cuando nuestra fortuna pasa de b euros a a euros es

$$\Delta U = \ln(a) - \ln(b) = \ln\left(\frac{a}{b}\right)$$

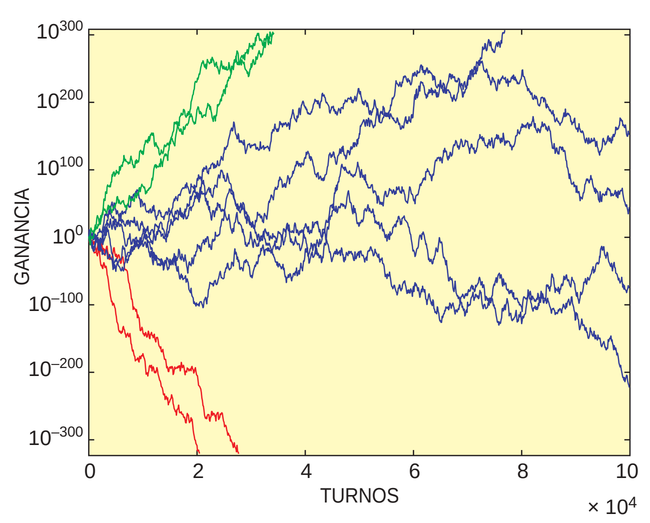
A partir de esta fórmula podemos calcular la utilidad media que uno obtiene si participa en el juego de San Petersburgo. Supongamos que la cuota de entrada es c y llamemos b a su capital inicial. El sorteo le puede deparar un premio de 2 euros con probabilidad 1/2. En este caso su nuevo capital sería de $b - c + 2$ euros.

Si gana 4 euros, lo que puede ocurrir con probabilidad 1/4, su nuevo capital será de $b - c + 4$ euros, y así sucesivamente. El incremento de utilidad que puede esperar, en media, del resultado del sorteo es:

$$\Delta U_{med} = \frac{\ln(b-c+2)}{2} + \frac{\ln(b-c+4)}{4} + \frac{\ln(b-c+8)}{8} + \ldots - \ln(b)$$

La cuota máxima que estaríamos dispuestos a pagar para entrar en el sorteo es la que hace que este incremento medio de la utilidad sea cero. Para hallar la cuota justa c, que será distinta según el capital inicial b, tenemos que solucionar la ecuación $\Delta U_{med} = 0$ con c como incógnita. En la figura 1 he dibujado la solución o cuota justa c en función del capital inicial b. La solución no se puede expresar en términos sencillos, aunque podemos calcularla para un caso particular, $b = c$, es decir, para el caso en que invertimos en el juego todo nuestro capital. ¿Cuándo merece la pena asumir este riesgo? Si hacemos $c = b$, nuestra ecuación $\Delta U_{med} = 0$ se simplifica y puede resolverse con algunos conocimientos de matemáticas. La solución es $c = 4$ euros. Si el capital inicial b es menor de cuatro euros, entonces la ecuación carece de solución, lo que indica que en este caso no merece la pena entrar en el juego por muy pequeña que sea la cuota. Por eso la curva de la figura 1 se interrumpe debajo de los 4 euros. Por otro lado, la cuota justa crece sin límite cuando lo hace el capital inicial. La solución no es del todo satisfactoria porque se basa en un supuesto acerca de cómo valoramos el dinero y porque la cuota depende del capital inicial. De todos modos, recordemos que tampoco era satisfactoria la solución del mes pasado, pues en ella la cuota depende del número total de turnos que se van a jugar.

Tom Cover, de la Universidad de Stanford, uno de los mayores expertos mundiales en teoría de la información y muy aficionado a las apuestas, analizó hace unos años la paradoja de San Petersburgo y ofreció una solución diferente e ingeniosa, que no hace referencia a ninguna valoración subjetiva del premio. Consideró una ligera y lógica modificación del juego original: podemos participar en el mismo pagando cualquier cantidad de entrada x, pero el premio recibido será proporcional a dicho pago.



2. Ganancia en el juego de San Petersburgo modificado por Cover con cuotas de 4 euros (*azul*), 3,9 euros (*verde*) y 4,1 euros (*rojo*).

Si el pago x es igual a la cuota c, entonces recibimos todo el premio; si es la mitad, recibimos la mitad del premio. En general, si el premio es P, recibiremos una cantidad xP/c. La segunda suposición, bastante más restrictiva, de Cover es que el jugador reinvierte todas sus ganancias en cada turno, de modo que, si su capital total inmediatamente antes del turno t es $X(t)$ y el premio en dicho turno es P_t, entonces:

$$X(t+1) = \frac{X(t)}{c} P_t$$

La evolución del capital recuerda la de una inversión continuada en Bolsa, como la que analizamos en los *Juegos matemáticos* de septiembre de 2005. Se puede resolver tomando el logaritmo de la ecuación anterior:

$$\ln X(t+1) = \ln X(t) + \ln P_t - \ln c$$

y promediando:

$$\langle \ln X(t+1)\rangle - \langle \ln X(t)\rangle = \langle \ln P_t\rangle - \ln c$$

Como vemos, el logaritmo del capital aumenta en media si la media del logaritmo del premio es mayor que el logaritmo de la cuota. De forma similar a lo que ocurría en la solución de Bernoulli, la cantidad importante es el valor medio del logaritmo del premio y no el valor medio del premio (que es infinito). Con un cálculo similar al realizado en el análisis de Bernoulli, se obtiene $\langle \ln P_t\rangle =$ $= 2\ln 2$. Por lo tanto, para que el logaritmo del capital no crezca ni disminuya en media (y no lo haga, por tanto, el capital), la cuota tiene que ser precisamente 4.

En la figura 1 podemos ver la evolución del capital en el juego de Cover para 100.000 turnos con distintos valores de la cuota. El capital tiene tantas fluctuaciones, que lo he dibujado en una escala logarítmica. He realizado cinco simulaciones del juego para una cuota igual a 4 euros, que pueden verse en azul en la figura, dos para cuota 3,9, en verde, y dos para cuota 4,1 en rojo. Para la cuota de 4 euros las fluctuaciones son enormes, positivas y negativas. Sin embargo, una ligera desviación de esa "cuota justa" hace que el capital crezca siempre a infinito (*curvas verdes*) o decrezca a cero (*curvas rojas*). La idea de Cover no es una solución de la paradoja, si bien constituye un método ingenioso para que el logaritmo aparezca sin utilizar valoraciones de los premios, que es en definitiva lo que hace la solución de Bernoulli.

Hay algunos aspectos de la Paradoja de San Petersburgo que aún no hemos cubierto, como la solución de Euler, basada en medias geométricas de la ganancia (equivalente a la de Bernoulli). Sobre la paradoja han discutido grandes matemáticos, aportando observaciones cuando menos curiosas. A raíz del artículo del mes pasado, Fernando Pérez Dehesa me ha enviado unas notas, extraídas del libro de Mauricio Kraitchik *Matemáticas Recreativas*, en las que se pueden leer comentarios muy interesantes de conocidos matemáticos del siglo XVIII y XIX. También quiero agradecer a otro lector, Carlos Macía, la sugerencia de discutir la paradoja en la sección. Como han podido comprobar, ha dado lugar a dos artículos y quizá nos depare más sorpresas en el futuro. ¡Anímense a sugerirme otros temas para la sección!

parr@seneca.fis.ucm.es

Mark Fischetti

CESPED DEPORTIVO

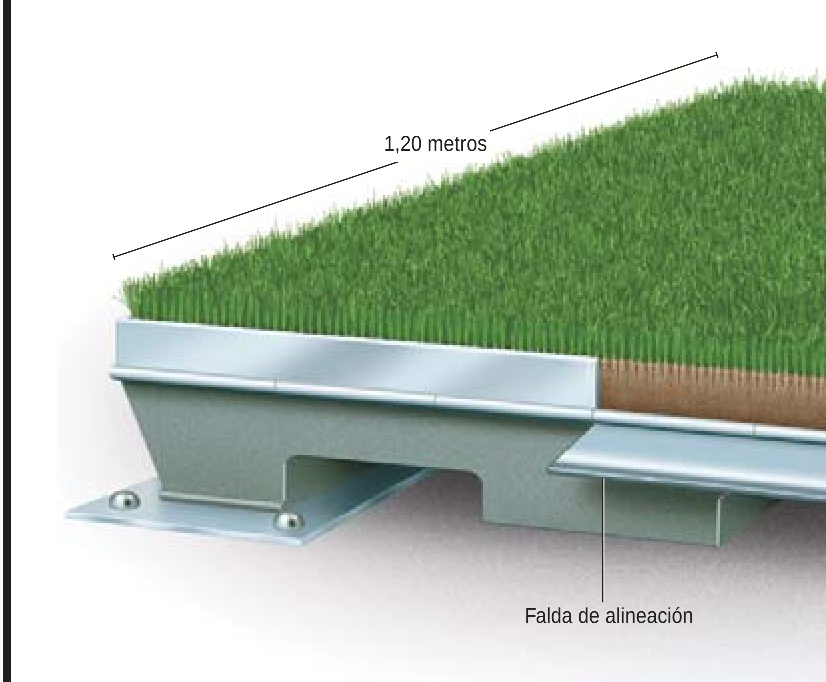
¿Hierba o plástico?

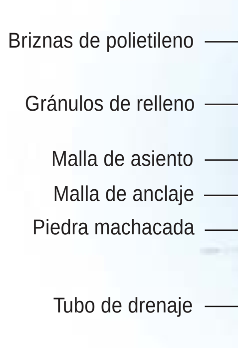
En los estadios se está desarrollando una dura competición: los campos de hierba contra el césped artificial.

El uso estropea rápidamente los campos de hierba, sobre todo durante los períodos de lluvia, frío o sequía. Como contramedida, se han ideado subestructuras que avenan con prontitud el exceso de agua para mantener el suelo firme; también bombean aire caliente para facilitar el crecimiento de las raíces. Los materiales sintéticos se difundieron a finales de los años sesenta. Sin embargo, los jugadores afirmaban que se notaba duro bajo los pies y se quejaban de quemazones por fricción cuando caían al suelo. En el último decenio, una nueva generación de productos se han impuesto ampliamente. Proclaman éstos una mayor suavidad de la hierba y un apoyo más firme para los pies; ello se logra mediante “rellenos” de gránulos de caucho o de caucho y arena entre las briznas de la “hierba”.

Pero sigue el debate sobre cuál es la superficie preferible. El verano de 2006, la Universidad de Purdue renovó su campo de fútbol americano con una nueva cepa de hierba de las Bermudas, creada para soportar bajas temperaturas. En la opinión de Al Capitos, responsable del césped deportivo del centro, los nuevos materiales sintéticos son muy buenos, pero todavía no hay nada mejor que la hierba. Los entrenadores reconocen que los jugadores prefieren la hierba, si se halla en perfectas condiciones. Pero la sequía la endurece, y la lluvia la hace resbaladiza e incluso accidentada. En los estados norteños, basta un partido embarrado después de septiembre, cuando la hierba deja de crecer, para perder el campo para toda la temporada. Así ocurre en el estadio nevoso de los Buffalo Bills en Orchard Park (Nueva York), donde hace años que emplean césped sintético.

También importan los costes. Una instalación sintética media cuesta entre 400.000 y 650.000 euros. La hierba oscila entre 200.000 y 400.000 o más euros, pero hay que abonarla, regarla y podarla. Las preferencias personales pueden remachar la decisión. En 2002, la Universidad estatal de Michigan sustituyó su césped artificial por módulos de hierba intertrabables de Green Tech, de Roswell (Georgia). Según Christ Scott, fundador de la empresa, la hierba parecía la mejor opción para la estatal de Michigan, que cuenta con un renombrado departamento de césped. En 2006, cuando los Bills renovaron su superficie sintética, Joe Frandina, gerente del estadio, optó por un proveedor distinto porque el producto tenía un tacto mucho mejor bajo los pies.





KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

1. EL CESPED SINTETICO, en placas o bateas, se tiende sobre una base de piedra machacada. Las briznas se mantienen enhiestas merced a un relleno de gránulos de caucho o de caucho y arena en suspensión. Las capas de respaldo inmovilizan las briznas y facilitan el drenaje.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ MATERIAL DE NEUMATICOS: Los gránulos de caucho del relleno del césped sintético proceden de neumáticos viejos. El "caucho ambiental" se muele hasta el tamaño de pequeñas cuentas. El "caucho criogénico" se mantiene congelado mientras se muele para que pueda reducirse al tamaño de partículas de arena. Sostienen los fabricantes que así la esfericidad de los gránulos es más uniforme, lo que da por resultado un relleno más ajustado y estable.

➤ HIERBA RETRACTIL: En agosto de 2006 la Universidad de Phoenix inauguró un nuevo estadio que luce el primer césped retráctil de Estados Unidos. Siguiendo el modelo de algunas instalaciones europeas, este campo de hierba hace uso de una plataforma de batea única, de 71 metros de ancho por 123 metros de largo, que se asienta sobre raíles de acero inmovilizados al suelo de hormigón. La masa de 7710 toneladas se tiende en el interior en los días de partido; los demás días se retorna al estacionamiento de vehículos. De ese modo, la hierba sigue creciendo mientras en el estadio se celebran congresos, conciertos y rodeos. También la techumbre, de tejido translúcido, es retráctil.

➤ LESIONES Y DOLENCIAS: Según los entrenadores de los Buffalo Bills, no se aprecian mayor número de lesiones entre los jugadores con las nuevas superficies artificiales (crítica que solía hacerse a los primeros productos). Las nuevas superficies sintéticas pueden asociarse a traumatismos en pies o piernas distintos de los que causa la hierba, pero no a un aumento global de las lesiones.

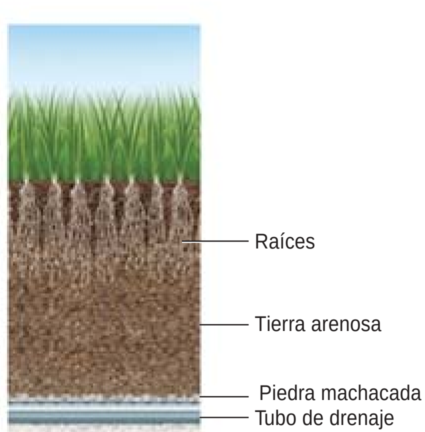
2. LA HIERBA NATURAL se cultiva en bateas reemplazables que se traban unas con otras.

Mezcla de tierra y arena

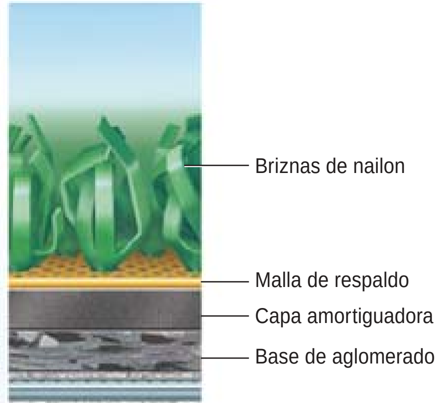
Piedra machacada

Base de polietileno

Canales de drenaje natural o por vacío, y calefacción por aire a presión



3. LA HIERBA COMUN se dispone sobre una capa de drenaje rápido.



4. LAS SUPERFICIES ARTIFICIALES sin rellenos hacen uso de fibras de nailon cosidas a una malla de respaldo solidaria de una capa ergoabsorbente. Esta está unida a una base de aglomerado de caucho, poliuretano y minerales.

Medioevalia

Optica

AL-FARGHANI: ON THE ASTROLABE. Texto árabe con su traducción al inglés y comentarios de Richard Loch. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2005.

CAMPANUS OF NOVARA AND EUCLID'S ELEMENTS. Edición crítica de H. L. L. Busard. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2005.

ROOTED IN THE EARTH, ROOTED IN THE SKY: HILDEGARD OF BINGEN AND PREMODERN MEDICINE, por Victoria Sweet. Routledge; Nueva York-Londres, 2006.

SEEING AND BEING SEEN IN THE LATER MEDIEVAL WORLD. OPTICS, THEOLOGY AND RELIGIOUS LIFE, por Dallas G. Denery II. Cambridge University Press; Cambridge, 2005.

QUIA INTER DOCTORES EST MAGNA DISSENSIO. LES DÉBATS DE PHILOSOPHIE NATURELLE À PARIS AU XIV SIÈCLE. Edición a cargo de S. Caroti y J. Celeyrette. Leo S. Olschki; Florencia, 2004.

A lo largo de los siglos octavo y noveno de nuestra era, la civilización islámica se apropió de la medicina, la ciencia y la filosofía griegas, así como de buena parte de la ciencia hindú persa. Contó para ello con un competente plantel de traductores del pahlavi, sánscrito, griego y siríaco; el árabe, la lengua de destino, se convirtió en la *lingua franca* del saber durante siglos. Entre el 800 y el 1450, los principales centros de estudio se hallaban en territorio islámico. Tuvo ese movimiento un arranque espectacular con la fundación de la Casa de la Sabiduría en Bagdad por el califa abásida al-Mamun (198/813-218/833) y la concesión de la dirección de la empresa a Hunain ibn Ishaq (192/808-260/873 o 264/877), quien centró su atención en la traducción y reelaboración de las obras de Aristóteles y Galeno.

El astrolabio constituía el instrumento astronómico por excelencia, lo mismo en el mundo musulmán que en el cristiano. La descripción más antigua que nos ha llegado sobre su construcción se la debemos al astrónomo árabe al-Farghani (Bagdad, ca. 856). Lo abordó en *al-Kamil*, un tratado que se nos ofrece ahora en magnífica edición crítica comentada, con notación matemática moderna, por Richard Loch. Más que detenerse en las construcciones numéricas, al autor le importan las tablas que han de permitir al usuario trazar líneas y círculos.

Sabido es que el astrolabio imita el movimiento de los cielos donde las estrellas permanecen fijas y rotan con la esfera celeste. El astrolabio es una representación plana de esa esfera en rotación. Las estrellas (y también el Sol, la Luna y los planetas) giran, sobre una lámina, en círculo frente al horizonte del observador y los almucántares (círculos paralelos al horizonte), sobre otra lámina, fija. Determinamos el tiempo del día (o de la noche) midiendo la rotación necesaria para traer la estrella desde el horizonte hasta el este (o el oeste).

Ahmad ibn Muhammad ibn Kathir al-Farghani trabajó en Bagdad para el califa al-Mamun, quien reinó de 813 a 833. Supervisó luego la construcción del "Gran Nilómetro" en al-Fustat (Viejo Cairo), ordenada por el califa al-Mutawakkil. Durante esa estancia en Egipto compuso su tratado sobre el astrolabio, pues los ejemplos aportados para ilustrar los cálculos matemáticos que implicaban la latitud local emplean el valor de 30 grados, una buena aproximación de la latitud de El Cairo. Una fecha verosímil para *al-Kamil* es el 225 Yazdijird (856-857 d.C.), que data la tabla estelar incluida en el tratado. Al-Farghani introduce, entre los preliminares matemáticos, el teorema fundamental de la proyección estereográfica. Concede a la oblicuidad de la eclíptica un valor de 23,33º. Sigue la división sexagesimal. Y por funciones trigonométricas utiliza el seno y el seno inverso (sen^{-1}), ambos de base 60.

Nuestro autor compuso, además, una síntesis de la astronomía ptolemaica en 30 capítulos, *Jawami ilm al-nujum wa-usul al-harakat al-samawiya* ("Compendio de la ciencia de las estrellas y los fundamentos de los movimientos celestes). El texto árabe se tradujo dos veces al latín en el siglo XII, por Juan de Sevilla y Gerardo de Cremona, así como al hebreo por Jacob Anatoli, quizás entre 1230 y 1235. Se han perdido o sólo se conservan en forma fragmentaria otros trabajos suyos: *Declaración sobre el cálculo de los siete climas*, *Libro de los relojes de sol*, *Explicación del zij* de Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi, mencionado por al-Biruni, y *Las razones subyacentes bajo el movimiento de las esferas*.

Coincidió la introducción del astrolabio y del álgebra en la Europa cristiana con la vida de Hildegard de Bingen (1098-1179), mujer de gobierno y escritora prolífica. Nacida en Böckelheim en el seno de una familia numerosa y acomodada, se educó en el monasterio de Disibodenberg, del que llegaría a ser abadesa. Fundó el monasterio de Rupertsberg, cerca de Bingen. Mantuvo correspondencia con papas y emperadores, mediando en varias crisis políticas. Formuló su propia versión de la regla benedictina, escribió 300 cartas y compuso setenta himnos y el primer drama musical de Europa (*Ordo virtutum*). Hildegard manejaba el latín con soltura, conocía los Padres de la Iglesia y había estudiado filosofía natural y medicina. En cinco obras importantes, no sólo abordó asuntos espirituales,

sino que aportó también soluciones teóricas a las observaciones físicas. En *Scivias*, *Liber vitae meritorum* y *Liber divinorum operum* se ocupa del origen del cosmos y de la interrelación entre sus componentes. En *Causae et curae* y en *Physica* resalta los aspectos prácticos de la ciencia; describe los tres reinos de la naturaleza y los pone en relación con el bienestar del hombre.

La vida de Hildegard transcurrió entre la Primera Cruzada y el Tercer Concilio de Letrán, es decir, en el Renacimiento del siglo XII, un período de expansión de las fronteras en Europa bajo un óptimo intervalo climático, de población creciente, de innovaciones técnicas propias o recibidas (molinos de viento, molinos de agua, destilación y astrolabio) y creación intelectual (álgebra). Se forjaron entonces las naciones estado de Inglaterra y Francia; tomaron forma las primeras universidades y escuelas de medicina. La consolidación de un poder real eficaz en Francia e Inglaterra trajo el orden necesario para el desarrollo de la ciencia, el arte y la filosofía.

En medicina, Hildegard recoge la tradición humoral, epítome de la fascinación de Occidente por el número cuatro, que podemos remontar hasta la numerología de Pitágoras. Había cuatro elementos (tierra, aire, agua y fuego), cuatro cualidades (caliente, frío, húmedo y seco) y cuatro humores (sangre, bilis, flema y melancolía). Cuatro eran también las estaciones (primavera, verano, otoño e invierno), cuatro las edades (infancia, juventud, edad adulta y ancianidad), cuatro órganos, cuatro temperamentos, cuatro colores y cuatro sabores, cuatro direcciones y cuatro vientos.

Antes de 1100, en el mundo cristiano predominaba la vertiente práctica de la sanidad, vale decir, los herbarios y recetarios, anónimos cuando no adscritos apócrifamente a un personaje clásico. Desde 1150, y hasta la llegada de una literatura vernacular, los escritos adquirieron un discurso escolástico. Y en ese contexto hemos de interpretar a Hildegard, a quien por las mismas fechas encontramos redactando *Causae et curae*, el manual más completo de medicina premoderna desde un enfoque netamente empírico.



Detalle del Libro de Horas de Maria de Medici.

Causae et curae se divide en cinco libros. En el primero, organizado a la manera del género enciclopédico, se pasa revista a la ciencia natural, de acuerdo con los cuatro elementos. Comenzaba con los objetos de naturaleza de fuego (sol, luna, estrellas, constelaciones y zodíaco); venían luego las cosas dotadas de naturaleza de aire (principalmente, los vientos); luego, las aguas (saladas y dulces, marismas y charcas, pozas y cursos fluviales), para concluir con las cosas dotadas de naturaleza de tierra (plantas, animales y tipos de suelos). El libro segundo, bastante más desordenado, abordaba la fisiología del cerebro, pulmones, riñones y corazón, así como los efectos del medio sobre el organismo (las cosas no naturales: alimento y bebida, descanso y ejercicio, emociones y clima). Contenía también fragmentos sobre la fecundidad de la mujer, la concepción y el parto, junto con instrucciones para las sangrías y la escarificación. En los libros tercero y cuarto, se incluían recetas para los síntomas y enfermedades comunes, de la cabeza a los pies. El libro quinto explicaba técnicas para la prognosis de acuerdo con la apariencia del paciente (ojos, rostro y voz), amén de los clásicos examen del pulso y observación de los fluidos (orina, sangre y heces). Concluía con un lunario que predecía la personalidad fundándose en la posición de la Luna en el momento de la concepción.

Victoria Sweet recurre al “aire” a modo de hilo de Ariadna para interpretar el pensamiento de Hildegard. En 31 pasajes de *Causae et curae* aparece el término *ventus*. Tiene aquí tres sentidos: vientos direccionales, que traen las estaciones; vientos locales, que explican el tiempo; y, por fin, el viento interno que atempera las cuatro cualidades. Los más importantes son los vientos cardinales, cada uno de ellos asociado con una dirección y con uno de los cuatro elementos. El viento del este constituye la verdadera fuerza de esa dirección y su cualidad primaria es la humedad; se identifica con el elemento agua y promueve la germinación de las semillas; evoca

la primavera, definida por su equinoccio. Por definición, el viento del oeste es direccionalmente opuesto al viento del este, lo que se refleja en la cualidad; donde éste pone humedad, el del oeste reseca; se identifica con el otoño, cuyo equinoccio señala. El viento del sur mantiene los polos helados; lejos de la zona templada controla el frío; es responsable de la maduración del fruto; corresponde a la estación de verano. El viento del norte significa obscuridad. Los vientos son además como la fuerza de la vida —*anima*— que empapa el cuerpo entero; son principios invisibles y organizadores del mundo. Cuando esa fuerza vital se escapa, el cuerpo se descompone.

Hasta finales de la Edad Media, el escrito matemático más influyente en Occidente fueron los *Elementos* de Euclides. El lector de *Investigación y Ciencia* ha tenido puntual conocimiento de la edición crítica de los principales textos latinos, depurados en su mayoría por H. L. L. Busard: traducciones del siglo XII del árabe al latín por Adelardo de Bath (*fl.* 1116-1142), Hermann de Carinthia y Gerardo de Cremona, una versión directa del griego, la compilación adscrita a Robert de Chester (del siglo XII también) y varios textos derivados. La compilación más frecuentemente empleada fue la de Campanus de Novara, del siglo XIII (antes de 1259). Nació éste en el primer cuarto del siglo XIII. Ocupó un puesto de confianza directa de los papas Urbano IV, Nicolás V y Bonifacio VIII. Murió en Viterbo en 1296. La reelaboración de Campanus de los *Elementos* de Euclides es la única obra de matemática pura que puede atribuírsele con seguridad. Se nos ha transmitido a través de un centenar largo de manuscritos.

Hasta la traducción de los *Elementos* del árabe al latín, en el siglo XII, Occidente sólo los conocía de manera fragmentaria, que derivaban de la traducción directa al latín que hiciera Boecio en torno al año 500. Tales extractos se ofrecen en cuatro textos diferentes: tres de ellos existían ya en el siglo IX en Corbie, capital geográfica del mundo medieval; el cuarto tratado se compiló en Lorena en el siglo XI.



Suelen abordarse las versiones de los *Elementos* del árabe al latín empezando por la llamada “Versión 1”, antigua Adelardo I. (En un artículo fundamental Marshall Clagett distinguía tres versiones atribuidas a Adelardo de Bath, conocidas desde su trabajo por “Versión I”, una traducción, “Versión II”, un compendio, y “Versión III”, una traducción.). Podría fecharse en el segundo cuarto del siglo XII, porque sabemos que la escribió antes de su obra sobre el astrolabio, *De opere astrolapsus*, que compuso entre 1142 y 1146. Robert de Chester fue el autor de la “Versión II”, antigua Adelardo II: la Versión II fue el texto euclidiano más popular e influyente en el Occidente latino de los siglos XII y XIII, con amplio uso de sus enunciados en los posteriores comentarios latinos a Euclides. La Versión III, antigua Adelardo III, no la escribió el de Bath: en la introducción aparece una mención de los *Analytica Posteriora* de Aristóteles, traducidos por Gerardo de Cremona en la segunda mitad del siglo XII. Sí se descubre un manifiesto vínculo entre la versión III y el *De curvis superficiebus*, un tratado en diez proposiciones que presenta un epítome de las pruebas de Arquímedes sobre medición de superficies y volúmenes de conos, cilindros y esferas, escritos por Johannes de Tinemue. Por su parte, la *Euclidis geometria* de Hermann de Carinthia representa, en el libro I, un texto mixto basado en una edición árabe. De la traducción de los *Elementos* del árabe al latín realizada por Gerardo de Cremona no se tuvo ejemplar manuscrito hasta 1901, descubierto por A. A. Björnbo. En el Medievo, la traducción de Gerardo no alcanzó la repercusión que tuvo el texto de Robert, menos cuidadoso.

La traducción directa del griego al latín comenzó también en el siglo XII. El punto de encuentro entre ambas culturas se hallaba en el reino normando de Italia meridional y Sicilia. Integrada en el Imperio Bizantino

Representación simbólica del universo (“huevo cósmico”). Frontispicio de la visión 3, *Scivias* I, folio 14 (1141-1151).

Los vientos del último día. Scivias 3, visión 12. Monasterio de Rupertsberg.

(hasta la caída de Siracusa en 878), esa región mantenía todavía numerosa población de habla griega. Estuvo bajo el dominio del Islam a lo largo de casi dos siglos, hasta 1060, cuando un aventurero normando conquistó Messina y asentó su poder. Los monarcas (Roger, Federico II y Manfredo) crearon una corte culta y cosmopolita, patrocinadora del saber. En Sicilia se tradujo a Euclides directamente del griego.

Los *Elementos* preparados por Campanus de Novara tienen un *terminus ante quem* en 1259, según asevera el códice más antiguo. Las *additiones* que Campanus realizó a su texto euclídeo básico son notables. Dedicó un cuidado notable a la elucidación y discusión de lo que él creía que estaba obscuro y a los puntos objeto de debate. Completó el texto euclídeo con material tomado de la *Arithmetica* de Jordanus de Nemore.

Por esa época la filosofía natural del Occidente cristiano tenía puesto todo su empeño en la ciencia de la perspectiva, es decir, de la óptica (*Seeing and being seen*). Al explorar los escritos de Roger Bacon, Pedro Aureol y Nicolas d'Autrécourt a la luz de un conjunto de guías de teología pastoral, incluido el *Tratado sobre el ojo moral* de Pierre de Limoges, Dallas Denery ilustra el interés medieval por el proceso de la visión y de la acción cognoscitiva. La ciencia medieval de la perspectiva no tenía nada que ver con el arte, sino que constituía una explicación sistemática de la luz, la percepción visual y el conocimiento. Combinaba elementos de la teoría médica de Galeno y de la filosofía natural aristotélica con análisis geométricos de Euclides y Ptolomeo. Buena parte de esa síntesis llegó a Europa a comienzos del siglo XIII, en una forma traducida de un texto árabe bajo el título de *De aspectibus*. Escrito hacia el 1030 por Alhacén (Ibn al-Haytham), *De aspectibus* (o *Kitab al-Manazir*) señala la culminación de la tradición óptica grecoárabe.

Central a la teoría de Alhacén es la creencia de que la visión no se produce por la emisión o *extramisión* de los rayos que el ojo proyecta sobre los objetos. Platón había abogado por esa tesis, defendida también por los estoicos e incluso por Agustín. En el siglo II, Claudio Ptolomeo desarrolló la versión más complicada de esa teoría cuando combinó la exposición geométrica euclidiana de la visión con las teorías fisiológicas de Galeno y la psicología aristotélica. La obra de Ptolomeo no se conoció en Europa hasta finales del siglo XII. A lo largo de esa centuria, Guillermo de Conches y Adelardo de Bath siguieron defendiendo formas menos complejas de la teoría. Lo mismo hizo, en el siglo XIII, Robert Grosseteste. La teoría de la *extramisión* tuvo sus oponentes. Los atomistas de la antigüedad habían propuesto ya una teoría alternativa de la percepción, una teoría de la *intromisión*. De acuerdo con Leucipo, por ejemplo, la percepción acontecía cuando las "efluencias" o "imágenes" emanaban del objeto hacia el ojo. Y aun cuando Aristóteles había presentado una crítica devastadora del atomismo, él y sus seguidores defendieron una versión propia de la teoría de la *intromisión*.

Alhacén admite que las opiniones de los "científicos naturales", defensores de la teoría de la intromisión, contradicen las tesis de los "matemáticos", seguidores de la teoría de la extramisión. Se trata, afirma, de diferencias más aparentes que reales, resultado de investigaciones incompletas y metodologías limitadas. Se aprestó a reconciliar ambos enfoques y fusionó el análisis geométrico de la percepción visual con un programa intromisista de la visión. Alhacén imagina que todo objeto visible consta de una colección discreta de puntos tenues. Cuando el objeto es iluminado, formas de luz y color reflejan o radian a partir de cada uno de esos puntos en todas las direcciones. La visión ocurre cuando esas formas alcanzan el ojo.

Bacon describía esta radiación como una multiplicación de especies. La fuente inmediata de esa idea fue Robert Grosseteste y, más específicamente, los escritos del filósofo

islámico al-Kindi. Lo mismo que las formas de luz y color de Alhacén, las especies de Bacon se multiplican a sí mismas en cada dirección posible. Bacon propondrá que sólo las especies que inciden perpendicularmente sobre la superficie del ojo son las realmente percibidas.

Hacia el final de su *Perspectiva*, Bacon proclama las maravillas y poderes de los espejos. Logran que un hombre parezca ser muchos hombres y una armada muchos ejércitos. Imaginemos que un ojo se sitúa en el centro de un espejo esférico, cóncavo. Las propiedades naturales de ese espejo son tales, que, doquiera que el ojo mire, sólo se verá a sí mismo. Imaginemos ahora que otro ojo, situado en cualquier sitio menos en el centro del espejo, mira el espejo. No verá nunca reflejada la imagen de ese otro ojo. Esos fenómenos peculiares, bien conocidos en la segunda mitad del siglo XIII, sirvieron de acicate a los ópticos medievales. Lo leemos, por ejemplo, en el *Tractatus moralis de oculis* de Pierre de Limoges. Los temas de la visión y de la invisibilidad, de ver y ser visto, informan el tratado.

La cuestión de la visión se prolonga en la centuria siguiente. El distanciamiento del aristotelismo se encarna en la obra de Nicolas d'Autrécourt, al tiempo que el desarrollo de la matemática impulsado por los filósofos de Oxford culmina en Nicole Oresme (*Quia inter doctores est magna dissensio*). Resuelto a dar una explicación filosófica del mundo, distinta de la escolástica, Nicolas d'Autrécourt apela a cuatro principios. No obstante, basa el primero en el axioma genuinamente aristotélico de la finalidad y economía de la naturaleza: "Dios y la naturaleza no hacen nada en vano" o la "naturaleza no opera superfluamente". El segundo y el tercer principios posibilitan la traducción de hechos psíquicos en los términos de la física atomista. El cuarto le sirve para afirmar el carácter probable de su filosofía. Para Nicolas d'Autrécourt, el mundo, considerado en su conjunto o considerado según sus partes, es perfecto, eterno y constituido por átomos.

Nicolas desarrolló su actividad en París entre 1330 y 1340. En su *Quaestio theologica*, una cuestión disputada sobre la intensificación de la visión, da cabida a los nuevos lenguajes de análisis, es decir, a los lenguajes de los límites (intensificación y remisión de las formas, *de minimo et maximo*, *primum et ultimum instans*). De acuerdo con uno de los dos manuscritos en que nos ha llegado, la *Quaestio* se propone resolver *Utrum visio alicuius rei nauralis possit naturaliter intendi*? Se trata de la intención y remisión naturales de las formas, en formas harto naturales, a saber: la visión y, luego por extensión, la cognición. El problema es para Nicolas cómo ocurre el tránsito de una visión *a* a una visión de una intensidad doble, 2*a*. El argumento de Nicolas consiste en sostener que es imposible pasar directamente de *a* a *2a* sin atravesar una infinidad de etapas graduales.

—LUIS ALONSO

Diagramas de Feynman

DRAWING THEORIES APART. THE DISPERSION OF FEYNMAN DIAGRAMS IN POSTWAR PHYSICS, por David Kaiser. The University of Chicago Press; Chicago, 2005.

Primero fueron los experimentos. El interés de los historiadores por la ciencia en acción, antes que por la versión disecada que presentan los libros de texto, desembocó en los años ochenta del pasado siglo en estudios ya clásicos sobre la construcción de hechos científicos, entre los que destaca la influyente monografía sobre la bomba de vacío (*Leviathan and the Air Pump*, 1985) de S. Schaffer y S. Shapin, últimos receptores del premio Erasmus (el Nobel de Humanidades holandés). Luego vino la teoría.

Desde finales de los años noventa menudean los trabajos que trasladan al ámbito de la creación y el desarrollo teóricos los hallazgos de la literatura sobre la experimentación, a saber, la dificultad que entraña la adquisición y transmisión del conocimiento científico, del tipo que sea; la existencia de aspectos tácitos difícilmente expresables verbalmente; y la necesidad concomitante del contacto personal entre científicos.

Kaiser, que reconoce su deuda con los trabajos de Andrew Warwick sobre la física matemática (*Masters of Theory: Cambridge and the Rise of Mathematical Physics*, 2003), o Ursula Klein sobre la química orgánica (*Experiments, Models, Paper Tools*, 2003), entre otros, aborda desde esta perspectiva la historia de una herramienta fundamental de la física contemporánea, los diagramas de Feynman. Richard Feynman (1918-1988), premio Nobel de física en 1965, desarrolló durante su etapa de estudiante un sistema simbólico para representar todas las opciones a considerar en el cálculo de la colisión entre partículas elementales. Kaiser hace de la difusión de los diagramas de Feynman su objeto de investigación, ocupándose sucesivamente de su difusión inicial entre 1948 y 1954 (parte I), de los cambios de significado que comportó su adopción por diversos científicos (parte II), y finalmente de la incorporación de los diagramas a los libros de texto y la diversificación de sus usos y aplicaciones (parte III).

La consideración de los diagramas como *herramienta* y la caracterización de la teoría como una práctica, constituyen los dos argumentos centrales de Kaiser, que manifiesta abiertamente no estar tan interesado en la génesis conceptual de los diagramas, cuanto en su desarrollo como técnica de cálculo y en su apropiación por físicos muy distintos. Más que del contexto de justificación, estaríamos pues hablando de un contexto de aprendizaje, deudor explícito de la máxima wittgensteiniana según la cual el significado se adquiere con el uso.

En este sentido, resulta significativo que los primeros intentos de su creador por difundir los diagramas entre sus colegas fueran poco afortunados. Otros científicos, particularmente Freeman Dyson, contribuyeron a la propagación internacional de los diagramas mediante la formación de *postdocs*, la circulación de *preprints* y otras innovaciones educativas de las décadas centrales del siglo XX, que se han convertido desde entonces en práctica común.

Como ocurre con la mayoría de las monografías histórico-científicas, las revelaciones del libro resultarán plausibles a los científicos en activo, lo que no quiere decir que hubieran sido capaces de reconocerlas por sí mismos, sin ceder a los estereotipos dominantes sobre la práctica científica. El lector general, por su parte, podrá asistir a la construcción de un elemento fundamental de la física contemporánea.

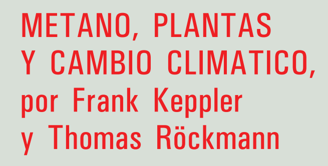
—XAVIER ROQUÉ





EL UNIVERSO INVISIBLE, por Christopher J. Conselice

La energía oscura acelera la expansión del universo y determina la forma y la separación entre galaxias.



METANO, PLANTAS Y CAMBIO CLIMATICO, por Frank Keppler y Thomas Röckmann

Aunque las plantas producen también metano, se debe a la actividad humana el origen del aumento de los gases de invernadero.



LA FORMACION DE CRISTALES DE NIEVE, por Kenneth G. Libbrecht

Sutiles procesos moleculares gobiernan el crecimiento de estructuras del hielo diversas y refinadas.

LEGO MOLECULAR, por Christian E. Schafmeister

Una colección sencilla de pequeños bloques de construcción se aplican al diseño y la fabricación de estructuras nanométricas, programadas para adoptar cualquier forma deseada.

LA EVOLUCION DE LOS LEPIDOSAURIOS, por Sebastián Apesteguía

Lagartos, serpientes y esfenodontes integran el grupo de los lepidosaurios, cuyo origen se retrotrae más allá de los dinosaurios. La evolución de los lepidosaurios en el hemisferio septentrional tuvo un curso distinto del seguido en el austral.

